

Unterschrift des Betreuers



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

*Erstellung eines modernen Koordinatentransformations-
und Abbildungsmoduls*

Ausgeführt am Institut für
Geodäsie und Geophysik
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von
Ao. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Weber
und
Dipl.-Ing. Gottfried Thaler
als verantwortlich mitwirkenden Universitätsassistenten

durch

Michael Lechner
Viehdorf 132
3322 Viehdorf

Datum

Unterschrift (Student)

Kurzfassung

Moderne geodätische Raumverfahren wie GNSS, VLBI, SLR oder DORIS erlauben die präzise Realisierung von 3D-Referenzsystemen. Diese Referenzsysteme bilden die Grundlage für die Positionsbestimmung und Navigation auf der Erde. Die Realisierung eines Systems durch Fixpunkte nennt man Referenzrahmen. Im Fall eines erdfesten Referenzrahmens verwendet man so genannte Fundamentalstationen, welche über eine oder mehrere Raumtechniken für die Bestimmung der Stationskoordinaten und Geschwindigkeiten verfügen. Allgemein hängt die Genauigkeit der Positionsbestimmung einerseits vom Messverfahren und andererseits von der Qualität des zugrundeliegenden Koordinatenrahmens ab.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen globalen, kontinentalen und regionalen terrestrischen Referenzsystemen. Wichtige globale Systeme sind das International Terrestrial Reference System (ITRS) sowie das World Geodetic System 1984 (WGS84). Das WGS84 bildet das Referenzsystem des Satellitennavigationssystems GPS. Für den europäischen Kontinent wurde im Jahr 1989 das European Terrestrial Reference System (ETRS) definiert. Als regionale Systeme bezeichnet man beispielsweise die Referenzsysteme einzelner Staaten. Österreich verwendet das Bezugssystem MGI, welches ursprünglich aus dem 19. Jahrhundert stammt, wobei die Realisierung heute durch modernste Messmethoden erfolgt.

Für viele wissenschaftliche und praktische Anwendungen in der Geodäsie stellt sich die Aufgabe, Punkte in unterschiedlichen Koordinatensystemen auszudrücken. Dieser Wechsel zwischen den zuvor beschriebenen Referenzsystemen erfolgt mit Hilfe geeigneter Koordinatentransformationen. Das Ziel dieser Arbeit ist es nun, ein modernes Koordinatentransformations- und Abbildungsmodul zu erstellen. Konkret wird die Transformation zwischen globalen oder kontinentalen Referenzrahmen (zum Beispiel: ITRF_{YY} , ETRF_{YY}) und einem regionalen geodätischen Datum (zum Beispiel: MGI) ermöglicht. Des Weiteren erlaubt die Software zwischen den Abbildungskoordinaten Gauß-Krüger, UTM und Lambert umzurechnen und berücksichtigt dabei implizit Datumsübergänge. Um dem Nutzer die Möglichkeit zu geben auch eigene Parameter einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation zu bestimmen, erlaubt das Programm eine überbestimmte Ableitung von Transformationsparametern mittels Passpunkten. Außerdem wird mit Hilfe geeigneter Geoid-Undulationsmodelle die Interpolation orthometrischer Höhen realisiert.

Abstract

Modern geodetic measuring techniques like GNSS, VLBI, SLR or DORIS allow the accurate realization of 3D-reference systems. These reference systems are taken as a basis for locating objects and navigation on earth. The realisation of a reference system by means of object coordinates and corresponding coordinate rates is called reference frame. In the case of a terrestrial reference frame, fundamental stations which are equipped with various measuring techniques are used in order to determine the coordinates and velocities of the stations. Generally speaking, the accuracy of determining a location depends on the one hand on the measuring technique and on the other hand on the quality of the underlying reference frame.

Basically we can distinguish between global, continental and regional terrestrial reference systems. Important global systems are the International Terrestrial Reference System (ITRS) as well as the World Geodetic System 1984 (WGS84). The WGS84 provides the reference system for the satellite navigation system GPS. For the European continent the European Terrestrial Reference System (ETRS) was defined in 1989. Reference Systems of individual states are often referred to as regional systems. Austria has established the framework MGI, which dates back to the nineteenth century. Today this framework is realised by the most modern measuring techniques.

Many scientific and practical geodetic tasks require the representation of the same physical points in different coordinate systems. This transition between different previously described reference systems can be achieved by a transformation of coordinates. The goal of this work is to build a modern coordinate transformation and mapping module. In detail, this module allows to transform coordinates given in global or continental frames (for example: $ITRF_{YY}$, $ETRF_{YY}$) into a regional geodetic datum (for example: MGI). Moreover the software allows the conversion among plane Gauß-Krüger, UTM, and Lambert coordinates by considering the transition of the datum implicitly. A further feature is the computation of parameters of a similarity transformation by means of control points. Additionally the interpolation of orthometric heights can be accomplished by using suitable geoid undulation models.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Koordinatensysteme	8
2.1	Grundlagen	8
2.2	Quasi-inertiale Systeme und deren Realisierungen	11
2.3	Globale terrestrische Referenzsysteme und deren Realisierungen	13
2.3.1	Allgemeine Definition	13
2.3.2	International Terrestrial Reference System (ITRS)	13
2.3.3	International Terrestrial Reference Frame (ITRF)	14
2.3.4	World Geodetic System (WGS 84)	17
2.4	Kontinentale Referenzsysteme und deren Realisierungen	18
2.4.1	European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)	18
2.4.2	EUREF Permanent Network (EPN)	20
2.5	System der österreichischen Landesvermessung	22
2.6	Realisierung von ITRS und ETRS in Österreich	24
2.6.1	Austrian Geodynamic Reference Frame (AGREF)	24
2.6.2	Austrian Reference Frame (AREF)	25
2.6.3	Austrian Positioning Service (APOS)	26
2.6.4	Weitere Echtzeitpositionierungssysteme in Österreich	28
3	Transformationen	30
3.1	Mathematische Grundlagen	30
3.1.1	Konforme Rotation	30
3.1.2	Räumliche Rotation orthonormierter Koordinatensysteme	32
3.1.3	Spiegelung	33
3.2	Räumliche Affintransformation	33
3.3	Räumliche Ähnlichkeitstransformation	34
3.4	Bestimmung der Parameter für die räumliche Helmert-Transformation	36
3.5	Transformation zwischen dem zälestischen (ICRS) und dem terrestrischen (ITRS) Referenzsystem	38

3.6	Transformation zwischen dem ITRF _{YY} und dem österreichischen Landesystem	39
3.7	Transformation zwischen den Referenzrahmen ITRF _{YY} und dem ETRF89	40
4	Abbildungssysteme	45
4.1	Konforme Abbildung	45
4.2	Die Gauß-Krüger Abbildung (Transversale Mercator Projektion) . . .	46
4.3	Universal Transverse Mercator System (UTM)	50
4.4	Die Kegelprojektion von Lambert	51
5	Programmbeschreibung TRANS	54
5.1	Allgemeines	54
5.2	Hauptmenü	55
5.3	Transformation	56
5.3.1	Allgemeine Einstellungen	56
5.3.2	Das Menü „Eingabe: kartesische Koordinaten“	58
5.3.3	Das Menü „Eingabe: Ellipsoidkoordinaten“	60
5.3.4	Das Menü „Eingabe: Gauß-Krüger Koordinaten“	62
5.3.5	Das Menü „Eingabe: Lambert Koordinaten“	64
5.3.6	Das Berechnungsprotokoll	66
5.3.7	Formatierung der Punktdateien	67
5.4	Transformationsparameter	69
5.4.1	Das Menü: „Eingabe: Transformationsparameter“	69
5.4.2	Das Menü „Berechnung: Transformationsparameter“	72
5.4.3	Das Menü „Referenzrahmen“	75
5.5	Weitere Parametermenüs	76
5.5.1	Das Menü: „Eingabe: Ellipsoidparameter“	76
5.5.2	Das Menü: „Eingabe: Gauß-Krüger-Parameter“	77
5.5.3	Das Menü: „Eingabe: Lambertparameter“	79
5.6	Geoidmodelle	80
5.7	Anwendungsbeispiele	82
5.7.1	Abschätzung einer Plattenverschiebung mit Hilfe von Koordinatentransformationen	82
5.7.2	Interpolation von Geoid-Undulationswerten	86
5.7.3	Bestimmung von Transformationsparametern	87
6	Zusammenfassung	89
	Anhang - Programm-Module	91

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	5
Literaturverzeichnis	107
Akronymverzeichnis	111

Kapitel 1

Einleitung

Moderne satelliten-gestützte Positionierungsmethoden basierend auf GPS, GLO-NASS und in Zukunft Galileo, aber auch andere globale geodätische Raumverfahren wie VLBI oder SLR machten die präzise Definition globaler terrestrischer Referenzsysteme notwendig. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Referenzsystemen und Referenzrahmen. Unter einem Referenzsystem versteht man die theoretische, ideale Definition eines Koordinatensystems im Raum. Die praktische Realisierung durch Fixpunkte, zum Beispiel durch Fundamentalstationen auf der Erde, oder durch extragalaktische Radioquellen im Weltall, nennt man Referenzrahmen. Zu jedem Referenzsystem kann es mehrere Realisierungen verschiedener Güte geben. Durch die wechselseitige Steigerung der Qualität des Messverfahrens einerseits und der Qualität des Koordinatenrahmens in dem die Messungen durchgeführt werden andererseits, kann die Genauigkeit iterativ gesteigert werden.

Gleichzeitig mit dem globalen ITRS wurde auch das für den europäischen Kontinent gültige ETRS definiert. Die erste Realisierung des ETRS89 erfolgte im Frühjahr 1989 und wurde vom ITRF89 abgeleitet. Das ETRS ist daher mit dem ITRS zur Epoche 1989.0 gleichzusetzen. Bis zum Jahr 1999 wurden unter der Leitung der EUREF-Subkommission insgesamt 24 GPS-Kampagnen zum Ausbau sowie zur Verdichtung des europäischen Netzes durchgeführt. Ab Mitte der 90-er Jahre entstand das European Permanent Network (EPN). Dieses GPS-Permanentstationsnetz ermöglicht eine ständige Realisierung des ETRS89.

Ganz allgemein gesprochen können mit Hilfe geeigneter Koordinatensysteme und Messmethoden, Positionierungs-, Navigations- oder auch andere messtechnische Aufgaben gelöst werden. Passt man das Koordinatensystem sowie den Koordinatentyp bestmöglich an die zu lösende Aufgabenstellungen an, so können die Messgrößen mathematisch korrekt und möglichst einfach beschrieben werden. Grundsätzlich wird ein Koordinatensystem durch den Ursprung, die Raumrichtung der Koordinatenachsen sowie die Metrik definiert. Dies ermöglicht eine eindeutige Zuordnung aller

Raumpunkte in einem System. Möchte man die Koordinaten dieser Raumpunkte zwischen verschiedenen Koordinatensystemen umrechnen beziehungsweise in verschiedene Koordinatentypen umwandeln, so kann dies mit Hilfe geeigneter mathematischer Vorschriften erfolgen. Aufgaben der Vermessung oder Kartographie erfordern beispielsweise die Abbildung sphärischer oder ellipsoidischer Koordinaten in ebene kartesische Koordinaten. Dazu stehen unterschiedliche Abbildungsverfahren wie zum Beispiel die Gauß-Krüger- oder die Lambert-Projektion zur Verfügung.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ein modernes Transformations- und Abbildungsmodul erstellt, das mehrere Aufgabenstellungen erfüllt:

- Übergang zwischen einem frei wählbaren globalen oder kontinentalen Datum (zum Beispiel: ITRF_{YY} , ETRF_{YY}) und einem regionalen geodätischen Datum (zum Beispiel: MGI).
- Transformation zwischen kartesischen, ellipsoidischen und den Abbildungskoordinaten Gauß-Krüger, UTM und Lambert.
- Die überbestimmte Ableitung von Parametern einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation.
- Die Interpolation orthometrischer Höhen mittels geeigneter Geoid-Undulationsmodelle.

Die Basis der Arbeit bildet das Koordinatentransformations- und Abbildungsmodul TRANS, das mit Hilfe des Programmpaketes MATLAB 7.8.0 (R2009a) erstellt wurde.

Die vorliegende schriftliche Fassung der Arbeit kann in 3 Teile gegliedert werden. Im ersten Teil werden die wichtigsten theoretischen Grundlagen, die bei der Entwicklung der Software verwendet wurden, erläutert (Kapitel 1 bis 4). Der zweite Teil beinhaltet eine detaillierte Programmbeschreibung inklusive einiger erklärender Beispiele sowie die Zusammenfassung (Kapitel 5 und 6). Der Anhang bildet den dritten Teil und beinhaltet den Quelltext der wichtigsten Programm-Module.

Kapitel 2

Koordinatensysteme

2.1 Grundlagen

Ein Koordinatensystem ist durch die Festlegung seines Ursprungs und der Basisvektoren (Richtung und Längeneinheit) bestimmt. Jeder Punkt der Ebene oder des Raumes ist dann durch die Angabe von Zahlen, welche in Form eines geordneten n -Tupel (a_1, a_2, a_3) angegeben werden, eindeutig bestimmt. Die Koordinaten werden meist in Form eines Vektors angegeben:

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

a_1, a_2, a_3 sind die skalaren Komponenten des Vektors und entsprechen den Koordinaten in einem Bezugssystem. Besteht die Basis aus drei orthogonalen Einheitsvektoren $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ so nennt man diese orthonormiert. Für das Skalarprodukt dieser Einheitsvektoren gilt:

$$\vec{e}_i \cdot \vec{e}_j = \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } i = j \\ 0 & \text{wenn } i \neq j \end{cases} \quad \text{für } i, j = 1, 2, 3 \quad (2.2)$$

δ_{ij} steht für das *Kronecker-Delta*.

Mit Hilfe der Koordinaten kann eine bestimmte Punktlage in Beziehung zu den Elementen des Koordinatensystems angegeben werden. Die Definition der Koordinaten kann auf verschiedene Arten erfolgen. In einem affinen Koordinatensystem können die Koordinaten eines Raumpunktes P zum Beispiel durch Normalprojektion auf die Koordinatenachsen (kovariante Koordinaten) oder durch Parallelprojektion auf die Koordinatenachsen (kontravariante Koordinaten) gewonnen werden. Im Fall eines kartesischen Koordinatensystems stimmen kovariante und kontravariante Koordinaten überein.

Man unterscheidet eine Vielzahl von Koordinatentypen welche je nach Aufgabenstellung ihre Verwendung finden. Hier soll ein Überblick über die für geodätische Anwendung wichtigsten Typen gegeben werden (Weber R. 2010):

1. Geradlinige Koordinaten

- kartesische Koordinaten in der Ebene
- kartesische Koordinaten im Raum
- affine Koordinaten

2. Krummlinige Koordinaten

- ebene Polarkoordinaten
- sphärische Polarkoordinaten (Kugelkoordinaten)
- Zylinderkoordinaten
- Ellipsoidkoordinaten

3. Natürliche Koordinaten

Kartesische Koordinaten

Ein räumliches kartesisches Koordinatensystem besteht aus 3 orthogonal aufeinander stehenden Achsen, welche sich im Ursprung des Systems schneiden. Weiters wird der Maßstab durch normierte Einheitsvektoren definiert. Der Wertebereich der Achsen erstreckt sich von $-\infty$ bis $+\infty$. Die orthonormierten Basisvektoren \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} definieren die Achsrichtungen, wobei die Orientierung der 3 Achsen üblicherweise im mathematisch positiven Sinn erfolgt und diese so ein Rechtssystem bilden.

Die 3 Koordinatenebenen erhält man, indem man jeweils eine Koordinate konstant setzt: Für $x=\text{const.}$ erhält man die yz -Ebene, für $y=\text{const.}$ die xz -Ebene und für $z=\text{const.}$ die xy -Ebene. Das Spatprodukt der drei Einheitsvektoren $[\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}]$ ergibt 1.

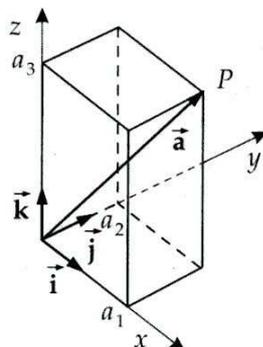


Abbildung 2.1: Kartesisches Koordinatensystem

Rotationssymmetrische Ellipsoidkoordinaten

Ein Rotationsellipsoid entsteht durch Rotation einer Ellipse um ihre kleine Achse und kann durch 2 Parameter eindeutig definiert werden (zum Beispiel durch die große und kleine Halbachse (a , b) der Ellipse). Eine mathematische Beschreibung kann durch die Gleichung eines Rotationsellipsoids in einem kartesischen Koordinatensystem, dessen Ursprung im Zentrum des Ellipsoids liegt und dessen z-Achse mit der kleinen Achse des Ellipsoids zusammenfällt, erfolgen:

$$\frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \tag{2.3}$$

Mit den Parametern a und b können eine Reihe von Hilfsgrößen berechnet werden:

$$\begin{aligned} f &= \frac{a - b}{a}, & c &= \frac{a^2}{b}, \\ e^2 &= \frac{a^2 - b^2}{a^2}, & e'^2 &= \frac{a^2 - b^2}{b^2} \end{aligned} \tag{2.4}$$

f	...	Abplattung
c	...	Polkrümmungsradius
e^2	...	1. Exzentrizität
e'^2	...	2. Exzentrizität

Ein Punkt P kann durch Angabe der ellipsoidischen Breite (B), der ellipsoidischen Länge (L) und der ellipsoidischen Höhe (H) festgelegt werden. Der Winkel B (auch geodätische Breite genannt) liegt zwischen der Äquatorebene (xy -Ebene) und jener Geraden, die normal auf die Tangentialebene in P steht und durch den Punkt P geht. Der Winkel L (auch geodätische Länge genannt) entspricht der Verdrehung der Meridianebene des Punktes P gegen die xz -Ebene. H beschreibt die Höhe des

Punktes über dem Ellipsoid. Sie ist als Länge der Normalen auf das Ellipsoid im betreffenden Punkt definiert.

Für die Umrechnung in kartesische Koordinaten mit Millimeter-Genauigkeit, müssen die ellipsoidische Breite und Länge auf 0.0001'' bekannt sein.

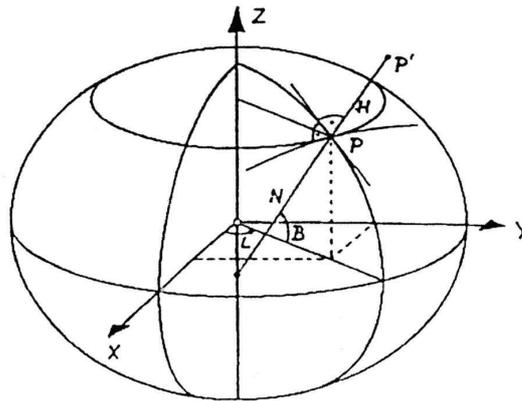


Abbildung 2.2: Ellipsoidkoordinatensystem

2.2 Quasi-inertiale Systeme und deren Realisierungen

In der klassischen Mechanik werden Inertialsysteme als ausgezeichnete Bezugssysteme, in denen die Trägheitsgesetze uneingeschränkt gültig sind, beschrieben. Sie ruhen bezogen auf den absoluten Raum, oder führen eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit aus. Weiters unterliegen sie keiner Rotation.

Die rotationsfreien, geozentrischen Systeme erfüllen aufgrund der beschleunigten Bewegung der Erde um die Sonne nicht die Kriterien eines Inertialsystems. Sie werden dann *quasi-inertiale Systeme* genannt. Bei so einem *quasi-inertialen System*, auch *Celestial Reference System* (CRS) genannt, handelt es sich um eine Annäherung an ein echtes Inertialsystem, da der Ursprung zwar eine beschleunigte Bewegung ausführt, die Koordinatenachsen aber streng parallel zu einem Inertialsystem verlaufen. Der große Vorteil von Inertialsystemen liegt in der einfacheren Berechnung der Bahnen von Himmelsobjekten, da die physikalischen Gesetze eine besonders einfache Form aufweisen. Die Definition folgt verschiedenen Konventionen, daher auch der Name *Conventional Inertial System* (CIS). Das aktuelle konventionelle himmelsfeste Referenzsystem wird *International Celestial Reference System* (ICRS) genannt und ist folgendermaßen definiert:

- Der Ursprung dieses kartesischen Koordinatensystems liegt im Massenzentrum

der Erde.

- Die z-Achse entspricht der Drehimpulsachse der Erde zur Standardepoche J2000.0 (1.1.2000, 12h UT).
- Die x-Achse zeigt zum Frühlingspunkt (wird relativ zu Positionen von Quasaren bestimmt).
- Die Zeit-Koordinate ist durch die internationale Atomzeit definiert.

Die Realisierung des ICRS erfolgt heute mittels VLBI-Beobachtungen der Positionen von extragalaktischen Radioquellen (Quasaren) und wird *International Celestial Reference Frame* (ICRF) genannt. Um Rotationsfreiheit zu garantieren, dürfen die verwendeten Quellen entweder keine Eigenbewegungen (hier ist die zur Himmelskugel tangentielle Bewegungskomponente gemeint) ausführen, oder die Bewegungen müssen hinreichend gut modelliert werden können. Die erste Realisierung des ICRS mittels Radiofrequenzen erfolgte durch das ICRF1. Diese Realisierung bestand aus 212 kompakten Radioquellen, die für die Orientierung der Achsen verwendet wurden. Durch die Weiterentwicklung und signifikante Verbesserung der VLBI Empfindlichkeit und Qualität wurde auf Vorschlag der IAU das ICRF2 eingeführt. Diese Realisierung enthält präzise Positionen von 3414 Radioquellen. Der Fehler des ICRF2 beträgt nur 40 Mikrobogen-Sekunden (μas) und die Achsstabilität beträgt $10 \mu as$. Das ICRF2 wird durch einen Satz von 295 Quellen (siehe Abbildung 2.3) welche einerseits eine hohe Positionsstabilität und andererseits wenig Unsicherheiten in der Quellstruktur besitzen, definiert. Die Stabilität dieser 295 definierenden Quellen sowie die gleichförmige Verteilung über dem Himmel, eliminieren die größten Nachteile des ICRF1 (ICRS 2010).

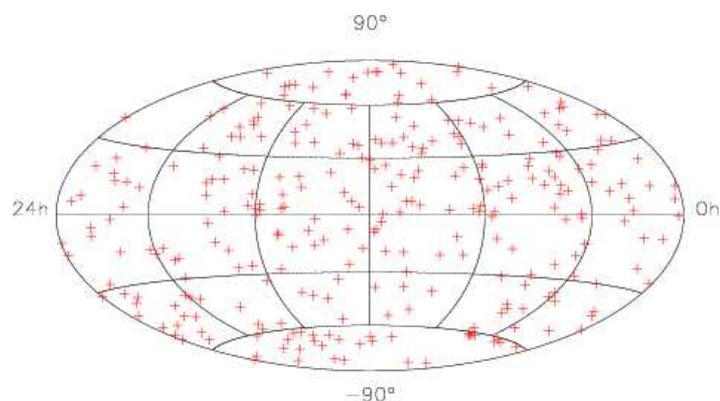


Abbildung 2.3: Definierende Radioquellen des ICRF2

Im optischen Bereich wird das ICRS durch Richtungsbeobachtungen (Rektaszension, Deklination) zu Sternen realisiert. Zur Zeit erfolgt die Realisierung durch den

HIPPARCOS-Katalog. HIPPARCOS ist ein Astronomie-Satellit, welcher zur Messung eines Netzes von etwa 100 000 Sternen eingesetzt wurde (1989-1993). Dieser Katalog enthält auch die Rektaszensionen und Deklinationen zu sämtlichen Sternen des Fundamentalkatalogs FK5. Aus verbesserten FK5-Daten und den HIPPARCOS-Ergebnissen ist für eine begrenzte Zahl von Fixsternen der FK6-Katalog entwickelt worden (Torge 2003).

2.3 Globale terrestrische Referenzsysteme und deren Realisierungen

2.3.1 Allgemeine Definition

Globale terrestrische Referenzsysteme sind räumliche, kartesische Koordinatensysteme, welche fest mit dem Erdkörper verbunden sind. Ihr Ursprung liegt im Erdschwerpunkt, wobei der Schwerpunkt für die gesamte Erdmasse mit den Ozeanen und der Atmosphäre definiert ist. Die z -Achse ist zum konventionellen mittleren terrestrischen Pol ausgerichtet. Die durch die x - und y -Achse aufgespannte Ebene liegt in der mittleren Äquatorebene und ist zur z -Achse orthogonal. Da die Rotationsachse im Laufe der Zeit die Lage innerhalb des Erdkörpers ändert, spricht man von einer mittleren Rotationsachse und Äquatorebene für eine bestimmte Zeitspanne. Die xz -Ebene repräsentiert die konventionelle mittlere Meridianebene von Greenwich. Diese Ebene ist durch die mittlere Rotationsachse und den Greenwich-Nullmeridian definiert. Die Achsen werden indirekt durch terrestrische Festpunkte (Stationskoordinaten) realisiert (Torge 2003).

2.3.2 International Terrestrial Reference System (ITRS)

Dieses System wurde entwickelt um den Anforderungen der präzisen geodätischen Vermessung in großräumigen oder globalen Netzen gerecht zu werden. Aufgrund der Tatsache, dass das Geozentrum sowie die Rotationsachse für Messungen nicht direkt zugänglich sind, werden die Referenzsysteme durch Konventionen festgelegt. Das ITRS wurde im Jahre 1989 mit folgenden Eigenschaften definiert (Höggerl et al. 2002):

- ITRS ist ein mit der Erde mitrotierendes System. Sein Ursprung liegt im Schwerpunkt der Erde (inklusive Ozeane und Atmosphäre).
- Die Längeneinheit ist der SI-Meter; Diese Definition ist konsistent mit der Verwendung der terrestrischen geozentrischen Koordinatenzeit zur Beschreibung

von erdnahen Vorgängen (zum Beispiel Satellitenbewegungen) im lokalen geozentrischen Rahmen.

- Die Polachse weist in Richtung des *Conventional International Origin (CIO)*. Der CIO entspricht dem Schnittpunkt eines Vektors ausgehend vom Erd-schwerpunkt in Richtung zum *Celestial Ephemeris Pol* (Himmelspol) mit der Erdkruste, gemittelt über die Jahre 1900-1905. Die xz-Ebene des ITRS beinhaltet den mittleren Meridian von Greenwich.
- Es werden per Definition keine allen Punkten gemeinsamen, horizontalen tektonischen Bewegungen zugelassen. Das tektonische Modell NNR-NUVEL1A beinhaltet die Restbewegungen.

2.3.3 International Terrestrial Reference Frame (ITRF)

Die Realisierung des ITRS wird *International Terrestrial Reference Frame* genannt und besteht aus einem Satz von kartesischen Stationskoordinaten sowie den dazugehörigen Geschwindigkeiten. Zusätzlich werden auch die Standardabweichungen der Koordinaten und Geschwindigkeiten angegeben. Aufgrund der Zeitabhängigkeit der Koordinaten muss auch eine Referenzepoche t_0 angegeben werden. Diese wird ungefähr in der Mitte der Beobachtungszeitspanne festgesetzt.

Der Referenzrahmen wird durch eine große Anzahl an Fundamentalstationen, verteilt über die ganze Erde, festgelegt (siehe Abbildung 2.4). Mit Hilfe der modernen geodätischen Raumverfahren VLBI, GPS, SLR, und DORIS werden Messungen an diesen Stationen durchgeführt. An manchen Stationen wird auch gleichzeitig mittels mehrerer Raumtechniken beobachtet.

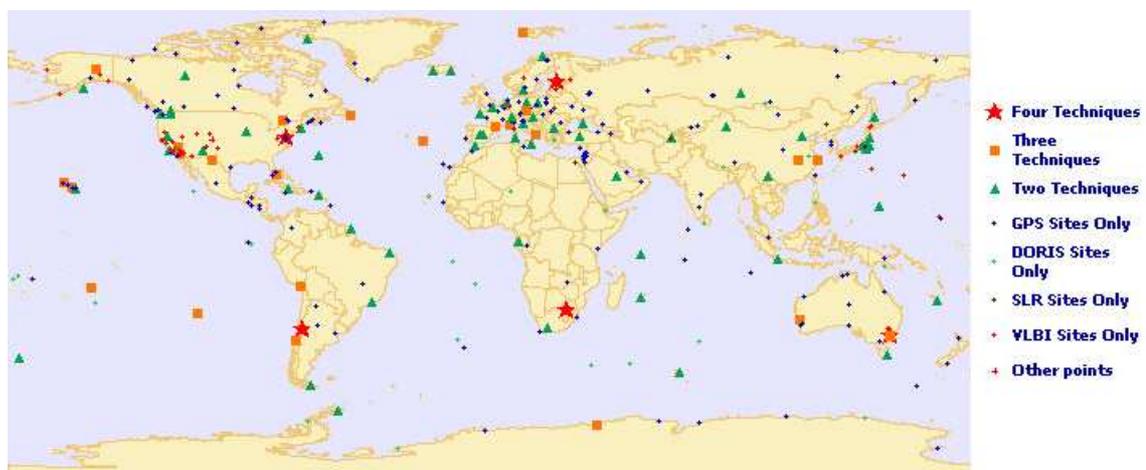


Abbildung 2.4: Stationen des ITRF2005

Wie schon erwähnt, erfahren die Stationskoordinaten aufgrund der Plattentektonik Verschiebungen. In Europa betragen die Werte ca. 2.5 cm pro Jahr in nord-östliche Richtung. Es ist daher notwendig die Stationskoordinaten regelmäßig neu zu berechnen und zusätzlich Geschwindigkeiten (Bewegung pro Jahr) anzugeben. Die Bewegung der Stationen des ITRF2008 soll anhand der Abbildung 2.5 veranschaulicht werden.

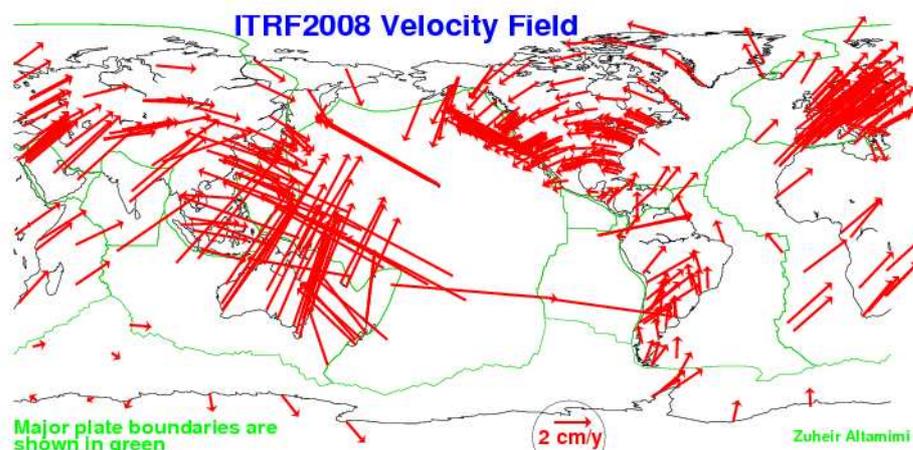


Abbildung 2.5: Geschwindigkeitsvektoren der ITRF2008-Stationen

Die Realisierungen werden unter der Bezeichnung ITRF_{YY} (zum Beispiel ITRF97) in den *Technical Notes* des IERS publiziert. YY gibt jenes Jahr an, in welchem die Messungen noch voll in die Berechnung der Realisierung eingegangen sind. Es darf nicht mit der Referenzepoche des Koordinatensatzes verwechselt werden. Die neueste Realisierung des ITRS ist zur Zeit das ITRF2008 zur Epoche 2005.0.

An dieser Stelle soll kurz die Datumsdefinition der Realisierung ITRF2008 gegeben werden:

- Ursprung: Der Ursprung der SLR-Koordinatenzeitserien zur Epoche 2005.0 sowie dessen Translationsraten werden unverändert für das ITRF2008 übernommen.
- Maßstab: Dem Maßstab und den Maßstabsänderungen zwischen dem ITRF2008 und dem Mittelwert aus VLBI- und SLR-Lösungen wird der Wert 0 zugewiesen.
- Orientierung: Die Rotationsparameter zur Epoche 2005.0 und auch die Änderungen der Rotationsparameter zwischen dem ITRF2008 und dem ITRF2005 werden auf den Wert 0 gesetzt. Diese zwei Bedingungen werden auf das Kern-

netzwerk angewandt.

Die verschiedenen Realisierungen unterscheiden sich in der Qualität der Stationskoordinaten und Geschwindigkeiten, sowie in der Anzahl der beteiligten Stationen. Heute werden die Lösungen der einzelnen Raumverfahren miteinander kombiniert. Diese Kombination ist deshalb wichtig da sich die einzelnen Verfahren weitgehend ergänzen:

- VLBI dient zur absoluten Lagerung im Raum.
- VLBI und SLR verfügen über die längsten Beobachtungsreihen. Diese sind für die Langzeitstabilität des Systems wesentlich. Außerdem wird der Maßstab durch diese Verfahren definiert.
- SLR-Beobachtungen sind sensitiv auf die Lage des Geozentrums relativ zum Koordinatenursprung der beobachteten Stationskoordinaten. Erst dadurch wird eine Lagerung des Koordinatensystems im Schwerpunkt der Erde möglich.
- DORIS dient zur Bestimmung von Punkten in entlegenen Gebieten.
- GPS sorgt für die Verdichtung des globalen Netzes.

Nun soll ein Berechnungsmodell für die momentane Position $X(t)$ eines fest mit der Erdkruste verbundenen Punktes aus einer regularisierten Position X_R und eines Korrekturvektors $\Delta X_i(t)$ angegeben werden. t bezeichnet die momentane Epoche (McCarthy D., Petit G. 2003).

$$X(t) = X_R + \sum_i \Delta X_i(t) \quad (2.5)$$

Durch die Einführung einer regularisierten Position X_R sollen hochfrequente zeitliche Variationen mit Hilfe eines Korrekturvektors $\Delta X_i(t)$ eliminiert werden. Die Korrekturen werden aufgrund folgender Effekte erforderlich:

- Gezeiten der festen Erde
- ozeanische Auflasteffekte
- Poltiden
- atmosphärische Auflasten
- Variationen des Geozentrums

Für die Berechnung von X_R zu einer bestimmten Epoche verwendet man das einfache lineare Modell:

$$X_R(t) = X_0 + \dot{X} \cdot (t - t_0) \quad (2.6)$$

X_0	...	Position zur Ausgangsepoche t_0
\dot{X}	...	Geschwindigkeit zur Ausgangsepoche t_0

Bei GPS-Beobachtungen ist die Koordinatentransformation in die Epoche der Messung von großer Wichtigkeit, da die präzisen Satellitenephemeriden jeweils zur aktuellen Epoche t vorliegen. Eine Nichtberücksichtigung der Koordinatendifferenz zwischen Ausgangsepoche und Epoche der Messung würde zu einer Inkonsistenz zwischen den Koordinaten der Bodenstationen und der Satelliten führen.

2.3.4 World Geodetic System (WGS 84)

Dieses terrestrische Referenzsystem wird vom amerikanischen Verteidigungsministerium seit 1960 entwickelt. Ursprünglich wurde es durch 1500 terrestrische Punkte, welche durch TRANSIT-Beobachtungen bestimmt wurden, realisiert. Die erste Realisierung war das WGS 60 gefolgt von den Realisierungen WGS 66, WGS 72 und WGS 84. WGS 72 und WGS 84 wurden zur Berechnung der TRANSIT und GPS-Ephemeriden verwendet. Dies bedeutet, dass sich GPS-Messungen nach wie vor auf das WGS 84 beziehen. Dieser Umstand hat zur weltweiten Akzeptanz des Systems geführt.

Dem WGS 84 ist das *GRS80-Ellipsoid* sowie das *Earth Gravitational Model 2008* (EGM2008) zugeordnet. Im Jahr 1989 lagen die Differenzen zwischen den WGS und ITRS Realisierungen im Meter-Bereich. Der Grund für diese großen Abweichungen lag hauptsächlich in den unterschiedlichen Beobachtungsverfahren. Das ITRF basierte ursprünglich auf den geodätischen Raumverfahren VLBI und SLR mit einer Genauigkeit im Zentimeter-Bereich. Das WGS 84 basierte hingegen auf Dopplermessungen des TRANSIT-Systems mit einer weit geringeren Genauigkeit. Die Genauigkeit der Koordinaten der TRANSIT-Beobachtungsstationen lag im Bereich von 1 bis 2 Metern. Weiters führten unterschiedliche Werte für die geozentrische Gravitationskonstante GM mit einer Differenz von $0.582 \cdot 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ zu einer messbaren Differenz in den Satellitenbahnen.

Es folgte eine Neudefinition des WGS durch die damalige *Defense Mapping Agency* (DMA), welche unter dem Namen WGS 84 (G730) am 2. Jänner 1994 eingeführt wurde. Es wurde dabei der Standardwert des IERS für die geozentrische Gravitationskonstante übernommen und die Koordinaten der GPS-Trackingstationen neu bestimmt. G730 gibt die GPS-Woche zum Zeitpunkt der Einführung an.

Eine weitere Realisierung des WGS 84 erfolgte mit der Bezeichnung WGS 84 (G873) durch die *National Imaging and Mapping Agency* (NIMA) am 29. Septem-

ber 1996. Diese Version stimmte mit dem ITRF97 im Rahmen von weniger als 2 cm überein. Der überarbeitete WGS 84 (G1150) Referenzrahmen wurde dann im Jahr 2002 eingeführt. Dieser zeigt bezogen auf das ITRF2005 systematische Differenzen von etwa einem Zentimeter. Die beiden Systeme können daher als identisch angesehen werden. (Hofmann-Wellenhof B. et al. 2008)

Wert	Parameter
6 378 137.0 <i>m</i>	Hauptachse <i>a</i>
1/298.257 223 563	Abplattung <i>f</i>
$7\,292\,115 \cdot 10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit der Erde ω_e
$3\,986\,004.418 \cdot 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$	geozentrische Gravitationskonstante μ

Tabelle 2.1: Definierende Parameter des WGS 84-Ellipsoides

2.4 Kontinentale Referenzsysteme und deren Realisierungen

2.4.1 European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)

Durch die Plattenbewegung der eurasischen Platte relativ zum ITRF-Rahmen kommt es zu systematischen Koordinatenänderungen für alle auf der Platte liegenden Messpunkte von mehreren Zentimetern pro Jahr. Diese Verschiebungen ließen sich mit den Ansprüchen der Landesvermessungen auf Langzeitstabilität und einfache mathematische Handhabung nicht mehr vereinbaren und ein eigenes Referenzsystem für Europa, das die Koordinaten stabil im Rahmen der geforderten Genauigkeit hält, sollte geschaffen werden. Im Grunde hätte man diesen Effekt auch durch Festhalten der Referenzepoche eines ITRF_{YY} über viele Jahre erreichen können.

Im Jahre 1987 wurde durch die *International Association of Geodesy* (IAG) die *EUREF-Subkommission* geschaffen. Diese hatte die Aufgabe ein europäisches Referenzsystem zu entwickeln und eine Realisierung zu schaffen. Im Jahre 1990 wurden auf dem EUREF-Symposium in Florenz folgende Resolutionen zur Definition des ETRS beschlossen:

- Das ETRS ist mit dem ITRS zur Epoche 1989.0 gleichzusetzen.
- Das ETRS ist fest mit dem stabilen Teil der eurasischen Platte verbunden.

Das neue System wird ETRS89 genannt. Aufgrund der obigen Definitionen bleiben die Beziehungen zwischen den Punkten auf dem stabilen Teil der Eurasischen Platte unverändert (Höggerl et al. 2002).

Die erste Realisierung des ETRS89 erfolgte 1989. Es wurde dabei ein Teil der VLBI- und SLR-Stationen, die auch am ITRF89 beteiligt waren, verwendet. Noch im Jahre 1989 erfolgte eine Verdichtung der ersten Lösung mittels 92 Messstationen. Es wurde eine Genauigkeit von $\pm 4.3\text{cm}$ in der Lage und $\pm 6.2\text{cm}$ in der Höhe erreicht. Anschließend wurden bis 1999 24 GPS-Kampagnen mit insgesamt 146 Punkten gemessen. Es handelte sich um sogenannte Epochenmessungen, welche an die bestehenden ITRS und ETRS Punkte angebunden wurden. Eine weitere Ausbaustufe erfolgte durch die Installation einer großen Zahl von GPS-Permanentstationen Mitte der 90er Jahre. Dadurch konnte das ETRS89 permanent realisiert werden. Die Permanentstationen wurden im *EUREF Permanent Network* (EPN) zusammengefasst (siehe Abbildung 2.6). Durch eine eigens gegründete Arbeitsgemeinschaft mit dem Namen *Technical Working Group* (TWG) wurde eine Klassifizierung der gemessenen Punkte durchgeführt. Die Punkte wurden in 3 Klassen eingeteilt (Höggerl et al. 2002):

- CLASS A ($\pm 1\text{cm}$, unabhängig von der Epoche, nur für Permanentstationen erreichbar)
- CLASS B ($\pm 1\text{cm}$, nur für eine spezielle Epoche, nur für GPS-Kampagnen ab 1993)
- CLASS C ($\pm 5\text{cm}$, nur für eine spezielle Epoche, nur für GPS-Kampagnen von 1989-1992)

Die Stationsanzahl pro Land wurde durch die EUREF-Kommission beschränkt. Dadurch wird heute das Hauptaugenmerk eher auf die Verbesserung und weniger auf die Verdichtung des Netzes gerichtet. Aufgrund verschiedener Einflüsse unterliegen auch die Koordinaten des ETRS89 Änderungen. Die Hauptursachen sind (Höggerl et al. 2002):

- Genauigkeitssteigerungen bei den GNSS-Messungen
- Änderungen in der Lagerung und Orientierung des ITRF und damit des ETRF
- Eigenbewegungen von Teilen der Eurasischen Platte
- Fehler im Rotationsmodell der Eurasischen Plattentektonik
- Verdichtung des Referenzstationsnetzes

Aus diesem Grund existieren wie beim ITRS auch beim ETRS mehrere Realisierungen, wobei im europäischen System die Koordinatenänderungen pro Jahr im Allgemeinen im 1-2 mm Bereich liegen. Heute existieren folgende Realisierungen:

- ETRF89 - ETRF94
- ETRF96 - ETRF97
- ETRF2000
- ETRF2000(R05)

Um von der höheren Koordinatengenauigkeit der ITRF2005-Lösung zu profitieren, wurden alle europäischen Stationskoordinaten des ITRF2005 in den ETRF2000-Referenzrahmen transformiert. Diese ETRS89-Realisierung (Koordinaten, Geschwindigkeiten) wird ETRF2000(R05) genannt.

Die Zahl nach ETRF bezieht sich wie bei den ITRF-Realisierungen auf das Jahr in welchem die Messdaten noch voll in die Berechnungen der jeweiligen Realisierung eingegangen sind. Die Koordinatenrahmen ITRF und ETRF bewegen sich in Folge der Kontinentaldrift stetig auseinander. Dadurch müssen zwischen den ITRF-Versionen und dem ETRF89 periodisch neue Transformationsparameter berechnet, beziehungsweise die Parameter mit einem zeitabhängigen Term erweitert werden.

2.4.2 EUREF Permanent Network (EPN)

Unter der Leitung der EUREF-Subkommission kam es im Jahre 1995 zur Ausbildung des EPN. Das Ziel war, eine permanente Realisierung des ETRS89 zu installieren. Die damals verfügbaren GPS-Permanentstationen wurden zu einem Gesamtnetzwerk verknüpft. Die großen Vorteile so eines Netzwerks liegen in einer homogenen Koordinatenbestimmung, der Gewährleistung von Qualitätsstandards und einer frühen Fehlererkennung. Aufgrund der schnell zunehmenden EUREF-Stationsdichte wurde eine Zulassungsbeschränkung eingeführt. So werden neue Stationen nur zugelassen, wenn die Entfernung zur nächstgelegenen Station größer 300 km ist und wenn die Station bezüglich Aufbau, Ausrüstung, Datenlieferung und Dokumentation von Veränderungen strenge Vorgaben erfüllt. Außerdem wird eine tägliche Lieferung von GPS-Messdaten in der geforderten Qualität von allen beteiligten Stationen verlangt.

Die Daten werden zuerst zu 7 lokalen Datenzentren übermittelt. Eines dieser Zentren ist das Observatorium Lustbühel Graz (OLG). Nach einer formalen Kontrolle werden die Daten an das zentrale Datenzentrum des *Bundesamts für Kartographie und Geodäsie* (BKG) in Frankfurt am Main geliefert. Der Datenaustausch erfolgt im Format RINEX (Receiver Independent Exchange). Dieses wird wegen der großen

Datenmengen aber doppelt komprimiert. Ein sogenannter *data flow coordinator* administriert und organisiert den Datenfluss aus ganz Europa.

Die Berechnungen werden von 15 lokalen Rechenzentren ausgeführt. Unter diesen befindet sich wiederum das OLG welches von ÖAW und BEV gemeinsam betrieben wird. Diese Zentren berechnen jeweils Teilnetze. Eine Bedingung ist, dass jede einzelne EPN-Station in mindestens 3 Teilnetzen enthalten ist. Durch die redundante Berechnungsweise sollen unentdeckte Fehler reduziert werden und eine bessere Abschätzung der Genauigkeit durch den Vergleich der Teillösungen ermöglicht werden. Die Teilnetze werden anschließend zu einem gesamten EPN-Netz vereinigt.

Änderungen in den Stationskoordinaten werden analysiert und dem Netzbetreiber mitgeteilt. Diese Koordinatenänderungen entstehen einerseits durch lokale Effekte und andererseits durch Veränderungen, die sich aus der Verbesserung des gesamten Systems ergeben (Höggerl et al. 2002).

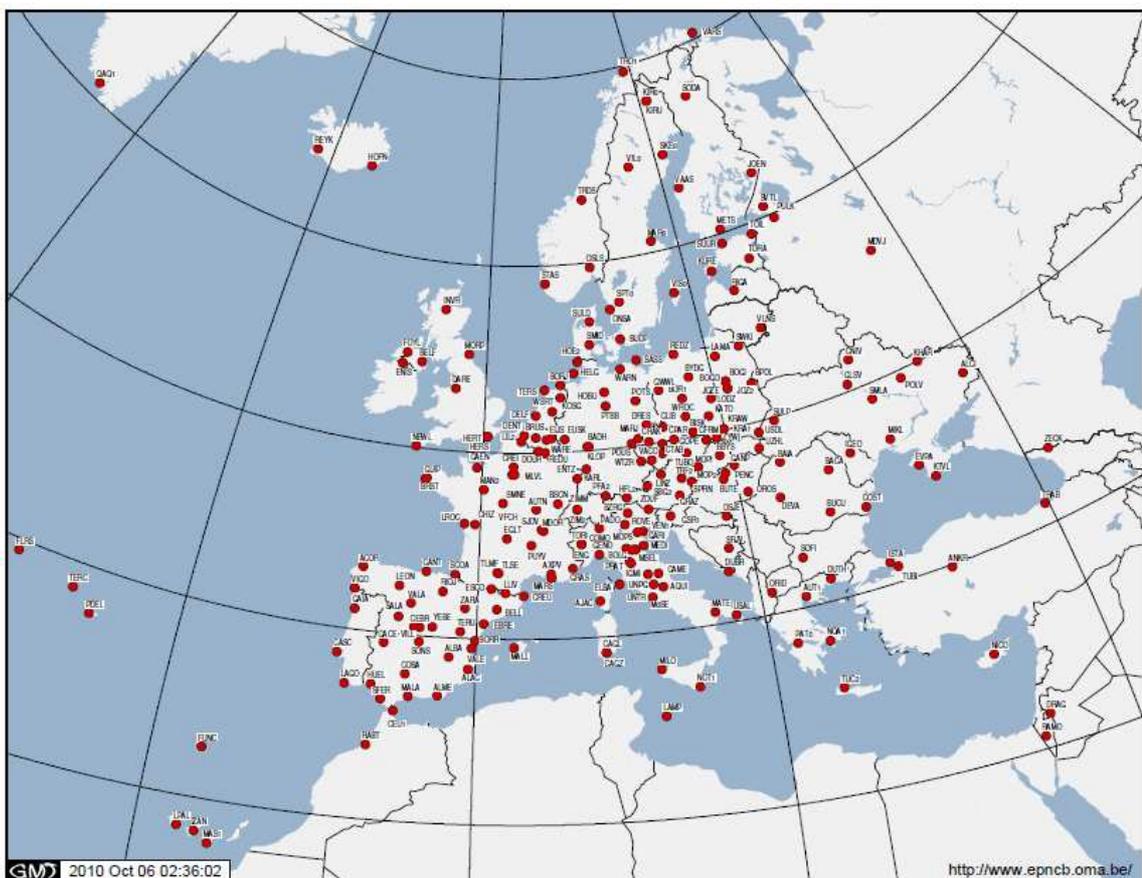


Abbildung 2.6: Stationsverteilung im EUREF Permanent Tracking Network

2.5 System der österreichischen Landesvermessung

Ende des 19. Jahrhunderts wurde vom damaligen *Militärgeographischen Institut* (MGI) das Datum der österreichischen Landesvermessung eingeführt. Als Bezugsellipsoid wurde das sogenannte Bessel-Ellipsoid definiert ($a = 6\,377\,397.155\text{ m}$, $b = 6\,356\,078.963\text{ m}$), welches im Fundamentalpunkt am Hermannskogel (Habsburgwarte) gelagert ist. Durch astronomische Messungen wurden Breite ($B_0 = 48^\circ 16' 15.29''$), Länge ($L_0 = 33^\circ 57' 41.06''$ östlich von Ferro) und das Ausgangsazimut ($A_0 = 107^\circ 31' 41.70''$) zum Hundsheimer Berg bestimmt. Diese astronomisch bestimmten Werte wurden fehlerfrei als ellipsoidische Werte übernommen. Die Lotabweichungen sowie die Geoidundulation im Fundamentalpunkt wurden per Definition Null gesetzt und die kleine Halbachse des Ellipsoides wurde parallel zur Erdrotationsachse angenommen. Daher variieren die Geoidundulationen – bezogen auf diese Lagerung des Referenzellipsoides – in Österreich nur zwischen relativ kleinen Werten (ca. -2 m bis +3 m). Für die Achslängen und die Lagerung eines mittleren Erdellipsoides liegen die Werte in Österreich im Bereich von +45 m.

Zur Realisierung des Koordinatensystems wurde ein Festpunktfeld 1.-5. Ordnung, bestehend aus ca. 50000 sogenannten *Triangulierungspunkten* (TP's) und ca. 250000 nachgeordneten *Einschaltpunkten* (EP's), aufgebaut. Die Koordinaten wurden durch Triangulierung und einer blockweisen Ausgleichung bestimmt. Die mittlere relative Punktgenauigkeit für benachbarte Triangulierungspunkte liegt bei $\pm 5\text{ cm}$ und für Einschaltpunkte bei $\pm 7\text{ cm}$. Kleine Fehler bei der Übernahme des Ausgangsazimutes resultieren heute in Verdrehungen der Achsen des österreichischen Bezugsellipsoides gegenüber dem geozentrisch gelagerten Systemen (ITRS, ETRS) im Bereich von einigen Altsekunden. Diese Verdrehungen führen zu langwelligen Inhomogenitäten. Weiters hatte die blockweise Ausgleichung des Festpunktfeldes kurzwellige Spannungen zur Folge, welche die langwelligen Spannungen überlagern.

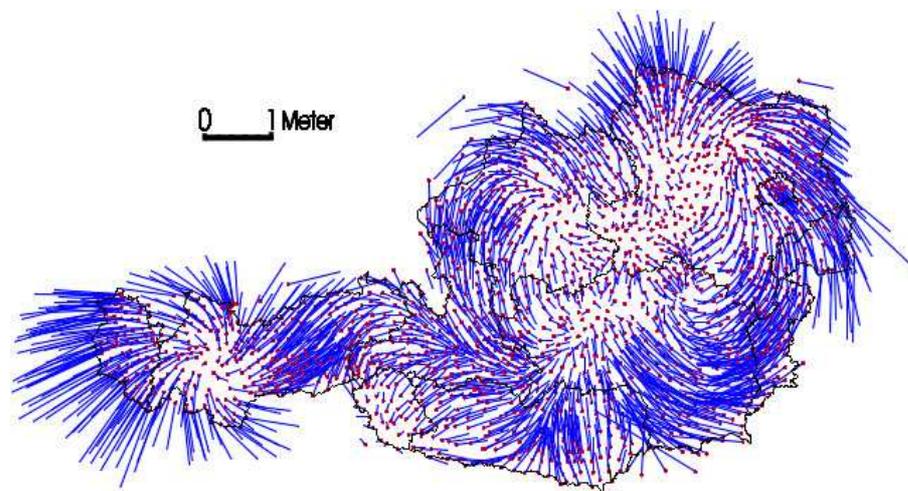


Abbildung 2.7: Kurzwellige Inhomogenitäten des Festpunktfeldes bezogen auf einen mittleren Transformationsparametersatz

Die Schaffung und Erhaltung des österreichischen Festpunktfeldes liegt im Zuständigkeitsbereich des BEV. Seit einigen Jahren werden jedoch verlorene Punkte aus wirtschaftlichen Gründen nicht mehr ersetzt. Dies führt zu einer Abnahme der Dichte des Festpunktfeldes.

Längenangaben in Österreich beziehen sich aus historischen und praktischen Gründen nicht auf Greenwich, sondern auf Ferro. Ferro ist die westlichste der kanarischen Inseln und galt bis ins Mittelalter als westlichster Punkt der bekannten Welt. Frankreich bezog im 18. Jahrhundert die Längenzählung auf die Sternwarte Paris. 1720 erfolgte auf Vorschlag des Kartographen DELISLE die Beibehaltung von Ferro als Bezugsmeridian durch folgende Definition: Der Bezugsmeridian Ferro liegt per Definition 20° westlich der Sternwarte Paris. Dies bedeutet, dass die österreichische Längenzählung eigentlich auf die Sternwarte Paris bezogen ist.

Nun soll noch die fest definierte Umrechnung zwischen den Bezugsmeridianen Greenwich und Ferro angegeben werden:

$$L_{Greenwich} = L_{Ferro} - 17^\circ 40' 00'' \quad (2.7)$$

Zur Abbildung der Ellipsoidkoordinaten in die Ebene wird die Meridianstreifenprojektion von Gauß-Krüger verwendet (siehe Kapitel 4.2). Das Staatsgebiet von Österreich wird dazu in 3 Meridianstreifen mit je 3° Längenausdehnung eingeteilt (siehe Abbildung 2.8). Die Mittelmeridiane liegen 28° , 31° und 34° östlich von Ferro. Zusätzlich zu den Koordinatenangaben sind auch die Streifen in welche abgebildet wird, anzugeben (M28, M31, M34). Für die Aufgaben der Landesvermessung wäre ein Wechsel des Koordinatensystems an den Streifengrenzen undenkbar. Daher werden die Streifen auf 2° westlich und östlich des Mittelmeridians ausgedehnt, wodurch

ein 1° breiter Überlappungsbereich entsteht (Bretterbauer K., Schuh H. 2004).

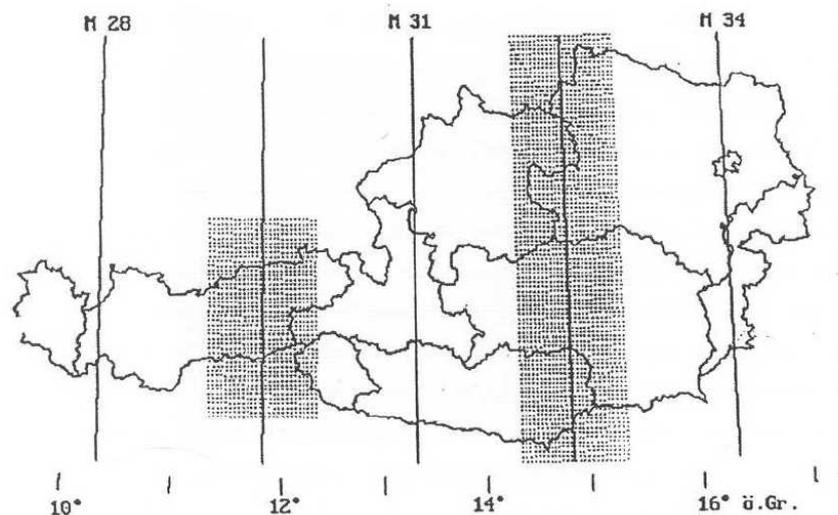


Abbildung 2.8: Meridianstreifenüberdeckung in Österreich

Das österreichische Höhengebrauchssystem entstand ebenfalls im 19. Jahrhundert. Als Referenzpunkt wird eine Bezugsmarke am Zollgebäude des Molo Sartorio in Triest angenommen. Das System wird als *quasi-orthometrisch* bezeichnet, da für die Berechnung der orthometrischen Höhen keine gemessenen sondern theoretische Schwerewerte (aus sphäroidischer Schwereformel berechnet) verwendet werden. Zusätzlich verfügt Österreich über ein modernes Höhennetz für wenige Punkte ausgezeichneter Nivellementlinien basierend auf Messungen eines *geopotentiellen Nivellements* (Verbindung eines geometrischen Nivellements mit Schweremessungen). Dieses ist auch Teil des europäischen Höhennetzes, wird jedoch zur Zeit nicht für praktische Anwendungen verwendet. Momentan werden die österreichischen Gebrauchshöhen in ein streng orthometrisches System mit Bezug auf den europäischen Horizont übergeführt (Weber R. 2010).

2.6 Realisierung von ITRS und ETRS in Österreich

2.6.1 Austrian Geodynamic Reference Frame (AGREF)

Dieses GPS-Referenznetz wurde für geodynamische Zwecke ab dem Jahr 1990 in einer Kooperation zwischen dem BEV und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften - Abteilung Satellitengeodäsie (Graz-Lustbühel) realisiert. Das Netz besteht in Österreich aus 80 stabilisierten Punkten, mit einem durchschnittlichen Punktabstand von 40 km und einem maximalen Punktabstand von 50 km. Bei der

Schaffung der Punkte wurde zum Teil auf die geodynamischen Anforderungen und Gegebenheiten Rücksicht genommen. Darüber hinaus wurde eine gute Verteilung über Österreich angestrebt. Die Punkte sind zu 90% geologisch gut stabilisiert. In der Endausbauphase, die nunmehr erreicht wurde, besteht AGREF mit den Punkten im benachbarten Ausland aus 120 Stationen, wovon 70% in Felsaufschlüssen, 10% als Pfeiler und 20% auf stabilen Gebäuden gegründet sind (ERKER et al. 1995). Als Hauptziele für die Realisierung von AGREF sind anzuführen:

- Schaffung eines hochgenauen dreidimensionalen Referenzpunktfeldes mit einer Genauigkeit von ± 1.5 cm in allen Punkten
- Verbesserung des Geoidmodells
- Untersuchung von tektonischen Bewegungen durch Wiederholungsmessungen

2.6.2 Austrian Reference Frame (AREF)

Der Grundgedanke war die Schaffung eines dichten flächendeckenden GPS-Grundnetzes mit einem maximalen Punktabstand von 25 km. Im Rahmen eines Abkommens zwischen BEV und der Bundeskammer für Architekten und Ingenieurkonsulenten wurden einerseits die AGREF-Punkte noch einmal neu eingemessen und andererseits ca. 300 weitere Punkte dem bestehenden Netz hinzugefügt. Als Referenzrahmen für die Koordinatenberechnung wurde das ITRF94 zur Epoche 1996.45 verwendet. Folgende Netzstruktur wurde für die Bestimmung des AREF-1 vorgesehen (Ahrer H., Döller H. 1997):

- Hierarchie 1 – IGS:
Anschluss an die nächstgelegenen IGS-Punkte Graz (A), Zimmerwald (CH) und Wettzell (D)
- Hierarchie 2 - AGREF:
Permanente Besetzung von AGREF-Punkten während der gesamten Meßkampagne
- Hierarchie 3 - AREF-1:
Messung von 7 Sessionen zu je 55 Punkten. Die Messdauer der Sessionen betrug je 24 Stunden mit 4 Stunden Zeitdifferenz zwischen den Sessionen. Die Redundanz wurde durch Messung von Nahtpunkten zwischen den Sessionen erhöht. Mittlerer Punktlagefehler: $\pm 1-1.5$ cm.
- Hierarchie 4 - AREF-n:
Es folgte eine stufenweise Verdichtung (AREF-1, AREF-2, ..., AREF-n) durch

lokale Messungen. Pro Messkampagne wurde mindestens ein AREF-1 Punkt eingebunden.

Heute werden die AREF-Koordinaten im europäischen Referenzrahmen ETRF2000 geführt.

2.6.3 Austrian Positioning Service (APOS)

APOS ist ein GNSS-Positionierungsdienst welcher mit der Methode der virtuellen Referenzstationen arbeitet. Dieser Dienst wird vom BEV für ganz Österreich bereitgestellt. GNSS-Signale werden zentral verarbeitet und daraus Korrekturparameter für die broadcast Satellitenbahnen, broadcast Satellitenuhren, Ionosphäre und Troposphäre berechnet. Anschließend werden die Korrekturen dem Nutzer in Echtzeit mittels GSM oder Mobile Internet (NTRIP via GPRS/UMTS) im RTCM-Format übermittelt (APOS Real Time). Dabei werden zwei Genauigkeitsklassen unterschieden (BEV):

1. APOS-RTK: Liefert Zentimeter-Genauigkeit für hochgenaue Anwendungen.
2. APOS-DGPS: Liefert Submeter-Genauigkeit.

Die Koordinaten der Referenzstationen sind im ETRS89 (ETRF2000) gegeben. Jede neue Netzlösung wird zuerst im ITRF gerechnet und anschließend mittels einer Helmert-Transformation in das ETRS89 transformiert. Dadurch beziehen sich auch die Messungen durch *APOS Real Time* auf das ETRS89. Derzeit besteht das APOS-Stationsnetz aus 43 GNSS-Permanentstationen in Österreich (BEV: 32, ÖAW: 3 und KELAG: 8) und 33 Stationen im grenznahen Ausland (siehe Abbildung 2.9). 8 dieser Stationen waren schon in der international akzeptierten Lösung *ETRS89 Austria 2002* enthalten. Die übrigen Stationen wurden seit 2003 kontinuierlich in diese Lösung eingerechnet (Höggerl et al. 2010).

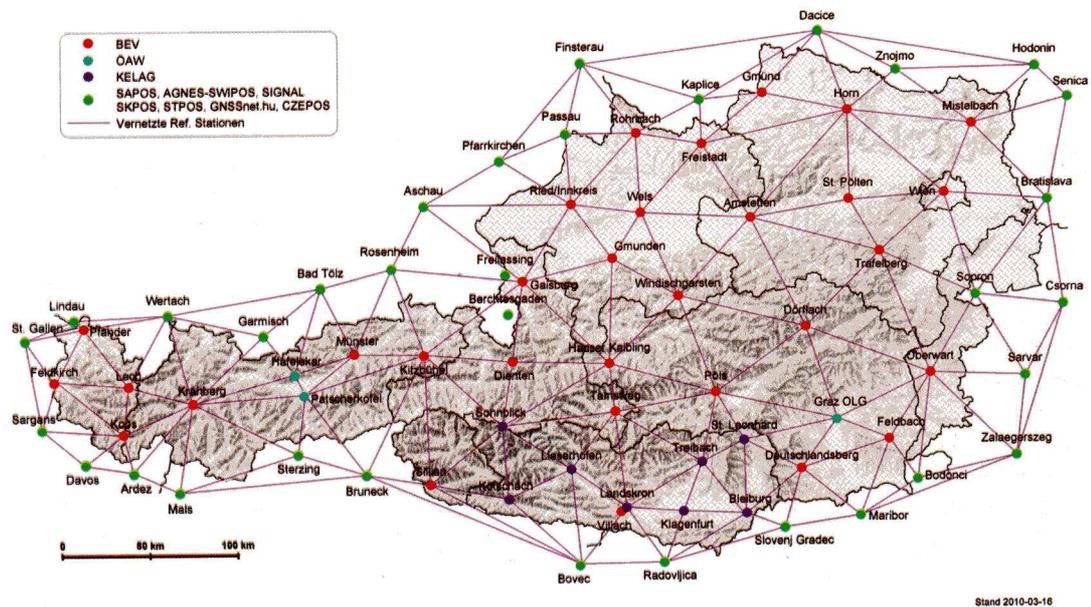


Abbildung 2.9: APOS-Permanentstationsnetz

APOS erfüllt zwei wichtige Funktionen:

1. Die Permanentstationen stellen nach der international akzeptierten Lösung *ETRS89 Austria 2002* die höchste Hierarchieebene in der Realisierung von ETRS89 in Österreich dar (siehe Abbildung 2.10).
2. Liefert Nutzern Koordinaten im nationalen ETRF89 Bezugsrahmen in Echtzeit.

APOS ist auch deshalb von so großer Bedeutung, weil alle Arbeiten zur Homogenisierung des Festpunktfeldes in Österreich auf den ETRS89-Koordinaten der APOS-Permanentstationen aufbauen.

Am Ende dieses Kapitels soll noch kurz auf die Realisierung von ETRS89 in Österreich eingegangen werden. Diese setzt sich aus mehreren Ebenen zusammen (Höggerl N. et al. 2010):

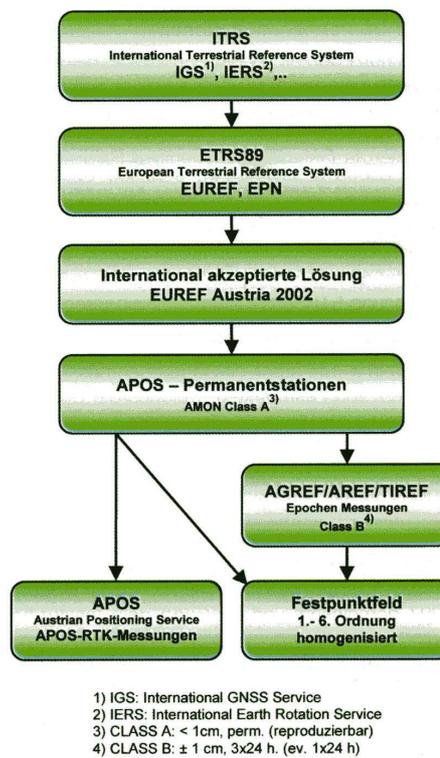


Abbildung 2.10: Hierarchieschema für die Realisierung von ETRS89 in Österreich

2.6.4 Weitere Echtzeitpositionierungssysteme in Österreich

Nachfolgend soll ein Überblick über die Referenzstationsnetze der österreichischen Energieversorger gegeben werden:

- WIENSTROM mit dem System WEP (Betrieb seit 2003)
- BEWAG mit dem System SATVB (Betrieb seit 1997)
- KELAG mit dem System KELSAT (Betrieb seit 2000/2001)
- EnergieAG mit dem System NETFOCUS (Betrieb seit 2004)
- EVN in Zusammenarbeit mit der EnergieAG mit dem System NETFOCUS (Betrieb seit 2004)
- Linz-AG mit dem System LIPOS (Betrieb seit 2004)
- ÖBB mit dem System TEPOS (Betrieb seit 2005)

- EPOSA: Der Zusammenschluss der Netze WEP, SATVB und TEPOS zur Generierung eines österreichweiten Referenzdienstanbieters (Betrieb seit 2009)

Als Ergebnis der Positionsbestimmung mit diesen Systemen erhält man Koordinaten im ITRF2000 zur Epoche 1997.0.

Kapitel 3

Transformationen

Eine häufig in der Geodäsie zu lösende Aufgabe stellt die Transformation von Punktkoordinaten zwischen Koordinatensystemen dar. Anders ausgedrückt, werden die Punktlagen relativ zu verschiedenen gelagerten Koordinatensystemen beschrieben. Die zu transformierenden Punkte werden also physisch nicht verändert, wohl aber die Koordinatenachsen und dadurch die Koordinaten der Punkte.

In diesem Kapitel sollen die wichtigsten Transformationsmodelle für den Übergang zwischen globalen, kontinentalen und nationalen Referenzrahmen beschrieben werden. Außerdem wird die Bestimmung der Transformationsparameter für die räumliche Ähnlichkeitstransformation, wie sie im Programm TRANS implementiert wurde, ausführlich erläutert.

3.1 Mathematische Grundlagen

3.1.1 Konforme Rotation

Die Drehung orthonormierter Koordinatensysteme kann durch spezielle, orthogonale Matrizen realisiert werden:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, \quad R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

R bezeichnet man als Dreh- oder Rotationsmatrix.

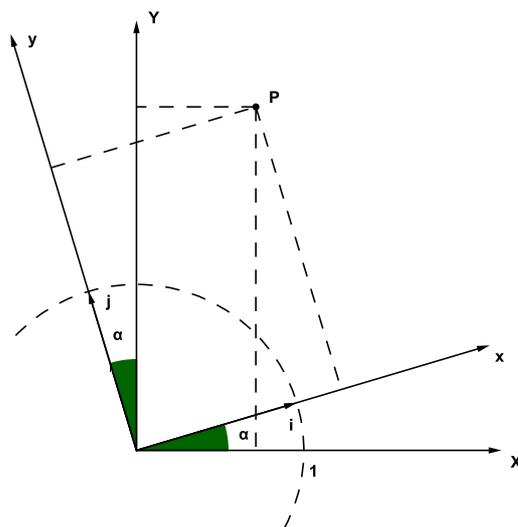


Abbildung 3.1: Ebene Drehung

Führt man die Einheitsvektoren \vec{i}, \vec{j} der Koordinatenachsen x, y ein und drückt die Komponenten im XY -System aus, so erhält man:

$$\vec{i} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{pmatrix}, \quad \vec{j} = \begin{pmatrix} -\sin(\alpha) \\ \cos(\alpha) \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Man erkennt sofort, dass die Elemente der Drehmatrix den Komponenten der Einheitsvektoren \vec{i}, \vec{j} entsprechen.

$$R = (\vec{i}, \vec{j}) \quad (3.3)$$

Im Falle einer orthogonalen Drehmatrix müssen die Einheitsvektoren folgende Orthogonalitätsbedingungen erfüllen:

$$\begin{aligned} \vec{i}^T \vec{i} &= \cos(\alpha)^2 + \sin(\alpha)^2 &= 1 &= r_{11}^2 + r_{21}^2 \\ \vec{j}^T \vec{j} &= \sin(\alpha)^2 + \cos(\alpha)^2 &= 1 &= r_{12}^2 + r_{22}^2 \\ \vec{i}^T \vec{j} &= -\cos(\alpha)\sin(\alpha) + \sin(\alpha)\cos(\alpha) &= 0 &= r_{11}r_{12} + r_{21}r_{22} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Multipliziert man die invertierte Matrix R^{-1} mit der Matrix R so erhält man die Einheitsmatrix E :

$$R^{-1}R = E$$

Auch bei der Multiplikation der transponierten Matrix R^T mit der Drehmatrix R erhält man die Einheitsmatrix E .

$$R^T R = E$$

Somit gilt für eine orthogonale Drehmatrix:

$$R^{-1} = R^T \quad (3.5)$$

Umkehrung der Rotation

Das Ziel ist es, Punkte vom übergeordneten XY-System zurück in das xy-System zu drehen. Man multipliziert einfach die Gleichung 3.1 von Links mit R^T (Kraus K. 2004):

$$R^T X = R^T R x = E x = x$$

Als Ergebnis erhält man:

$$x = R^T X \quad (3.6)$$

3.1.2 Räumliche Rotation orthonormierter Koordinatensysteme

Werden zwei oder mehr orthogonale Drehmatrizen miteinander multipliziert, so erhält man wieder eine Drehmatrix. Auf diese Weise können Rotationen um die x-, y- und z-Achse kombiniert werden und man erhält eine Gesamtdrehmatrix. Die Rotationsmatrizen um die einzelnen Achsen haben folgende Gestalt:

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega_x) & \sin(\omega_x) \\ 0 & -\sin(\omega_x) & \cos(\omega_x) \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

$$R_y = \begin{pmatrix} \cos(\omega_y) & 0 & -\sin(\omega_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\omega_y) & 0 & \cos(\omega_y) \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos(\omega_z) & \sin(\omega_z) & 0 \\ -\sin(\omega_z) & \cos(\omega_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Zu beachten ist, dass es bei der Multiplikation dieser Matrizen auf die Reihenfolge ankommt. Führt man eine Drehung um eine Achse durch, so wird bei den folgenden Drehungen um die zuvor gedrehten Achsen rotiert. Rotiert man der Reihe nach um die x-Achse, dann um die y-Achse und zum Schluss um die z-Achse so erhält man folgende Gesamtdrehmatrix (die Cosinus- und Sinus-Funktionen wurden durch die Buchstaben c und s abgekürzt):

$$R = R_z R_y R_x = \begin{pmatrix} c \omega_y c \omega_z & s \omega_x s \omega_y c \omega_z + c \omega_x s \omega_z & -c \omega_x s \omega_y c \omega_z + s \omega_x s \omega_z \\ -c \omega_y s \omega_z & -s \omega_x s \omega_y s \omega_z + c \omega_x c \omega_z & c \omega_x s \omega_y s \omega_z + s \omega_x c \omega_z \\ s \omega_y & -s \omega_x c \omega_y & c \omega_x c \omega_y \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

3.1.3 Spiegelung

Für manche Aufgaben der Geodäsie ist es notwendig Koordinatensysteme zu spiegeln. Will man zum Beispiel die Drehrichtung ändern so braucht man nur eine Achse des kartesischen Koordinatensystemes zu spiegeln. Man verwendet dazu sogenannte Spiegelungsmatrizen:

$$S_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

$$S_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

$$S_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

3.2 Räumliche Affintransformation

Bei dieser Transformation handelt es sich um eine lineare Abbildung mit einer nichtorthogonalen Abbildungsmatrix. Sie ist im allgemeinen nicht winkel- oder streckentreu.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{10} \\ a_{20} \\ a_{30} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

a_{10}, a_{20}, a_{30} ... Translationsparameter (Koordinaten des Ursprungs des Ausgangssystems, gegeben im Zielkoordinatensystem)
 $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{33}$... Elemente der Matrix (erfüllen die Orthogonalitätsbedingungen nicht). Diese Parameter lassen 3 Maßstäbe für die 3 Koordinatenrichtungen zu. Die Drehung einer Koordinatenachse wird durch 2 Winkel realisiert.

Eigenschaften:

- Im Ausgangssystem orthogonale Geraden sind nach der Transformation nicht mehr orthogonal.
- Parallele Geraden sind auch nach der Transformation noch parallel.
- Strecken weisen nach der Transformation andere Längen auf.
- Streckenverhältnisse auf parallelen Geraden bleiben erhalten.

Es handelt sich um eine *12-Parameter-Transformation*. Für die Berechnung der Parameter sind mindestens 4 Identpunkte erforderlich. In der Geodäsie werden im Allgemeinen konforme Transformationen, wie zum Beispiel die Ähnlichkeitstransformation, bevorzugt. Anwendungen der affinen Transformation finden sich beispielsweise bei der Berechnung von Näherungswerten für die 7-Parameter-Transformation oder in der Deformationsanalyse.

3.3 Räumliche Ähnlichkeitstransformation

Im Unterschied zur Affintransformation wird in diesem Fall eine orthogonale Drehmatrix R und ein einheitlicher Maßstab für alle Koordinatenrichtungen verwendet. Die rechten Winkel zwischen den Koordinatenachsen bleiben erhalten.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + (1 + m) \cdot R \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \tag{3.15}$$

- X_0, Y_0, Z_0 ... Translationsparameter (Koordinaten des Ursprungs des Ausgangssystems, gegeben im Zielkoordinatensystem)
- m ... Maßstabsfaktor (Wird häufig in *ppm* angegeben)
- R ... Gesamtdrehmatrix mit den Drehwinkeln $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ um die 3 Koordinatenachsen (siehe Matrix 3.10)

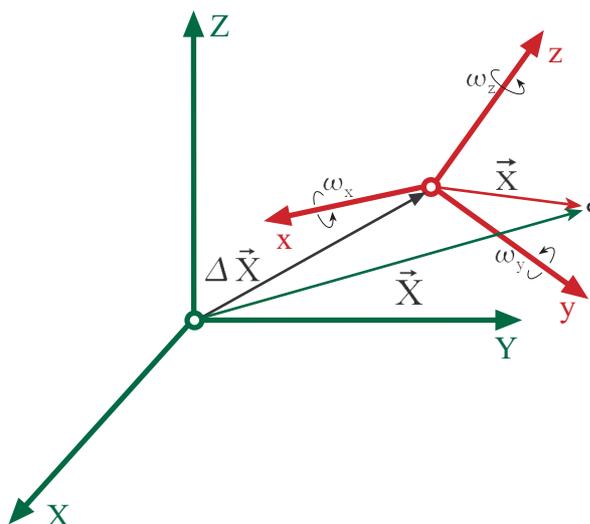


Abbildung 3.2: 7-Parameter-Transformation

Bei dieser Transformation bleibt die Form einer Figur erhalten. Ein Würfel im Aus-

gangssystem bleibt nach der Ähnlichkeitstransformation ein Würfel. Er kann sich nur verdrehen, verschoben und in seiner Dimension verändert haben. Aufgrund der Anzahl der freien Parameter (3 Translationen, 1 Maßstabsfaktor und 3 Drehwinkel) spricht man auch von einer *7-Parameter-Transformation* (wird auch *Helmert-Transformation* genannt). Man verwendet häufig zwei Variationen dieser räumlichen Helmert-Transformation:

1. **Bursa-Wolf-Modell:** Bei diesem Modell wird zuerst um den Ursprung des Ausgangskordinatensystems rotiert und danach der Verschiebungsvektor addiert. Dieses Modell wird optimaler Weise für die Transformation zwischen einem globalen, geozentrischen Referenzrahmen und einem regionalen, geozentrischen Rahmen verwendet.

Sind die Drehwinkel sehr klein (im Bereich von Bogensekunden) so kann der Sinus durch den Winkel selbst und der Cosinus durch 1 ersetzt werden. Weiters darf das Produkt von zwei oder mehreren Sinus-Werten vernachlässigt werden. Dadurch erhält man eine stark vereinfachte schiefssymmetrische Rotationsmatrix:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

$\omega_x, \omega_y, \omega_z \dots$ Drehwinkel in Radiant

Es sollte jedoch auf jeden Fall überprüft werden, ob die Genauigkeit der transformierten Punkte der Aufgabenstellung gerecht wird. Dieses Modell wurde zur Koordinatentransformation zwischen den verschiedenen Referenzrahmen im Programm TRANS implementiert.

2. **Molodensky-Badekas-Modell:** Das Ziel dieses Modells ist es die hohen Korrelationen zwischen Translations- und Rotationsparametern, welche beim Bursa-Wolf-Modell bei der Transformation sehr kleinräumiger Punktwolken auftreten, zu vermeiden. Statt um den Ursprung des Ausgangskordinatensystems zu drehen wird um einen Punkt im Zentrum der zu drehenden Punkte rotiert. Es wird also zuerst der Ursprung der Koordinatensysteme in den Schwerpunkt verschoben (entspricht einer Verschiebung aller Punkte um einen konstanten Vektor) und anschließend erfolgt die Rotation. Dieses Modell stellt eine Alternative zum Modell von Bursa-Wolf dar. Es wäre mit Vorteil zur Transformation von lokalen Netzen zwischen dem ITRF und dem nationalen Datum zu verwenden. Das Molodensky-Badekas-Modell wurde aber im Programm TRANS nicht realisiert, da Standardsoftware üblicherweise nur Bursa-Wolf-Parameter austauscht.

3.4 Bestimmung der Parameter für die räumliche Helmert-Transformation

Das Ziel ist es die 7 Parameter der räumlichen Ähnlichkeitstransformation zu berechnen. Man benötigt dazu mindestens 7 Gleichungen um die 7 Unbekannten eindeutig zu bestimmen. Ein Vollpasspunkt liefert dabei 3 Gleichungen. In der Praxis löst man das Problem jedoch überbestimmt mittels einer vermittelnden Ausgleichung.

Es soll nun der Rechenweg für den Fall der kleinen Rotationswinkel (siehe Matrix 3.16) beschrieben werden. Dieser Fall wurde auch für die Transformationsparameterberechnung im Programm TRANS implementiert. Als Näherungswerte für die Unbekannten kann für die Rotationen 0 gesetzt werden. Für den Maßstab wird 1 angenommen und die Näherungswerte für die 3 Translationen können mit Hilfe der genäherten Rotationen und des genäherten Maßstabes aus Passpunkten berechnet werden.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + (1 + m) \cdot \begin{pmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

Zuerst ist das Produkt $(1 + m) \cdot R$ zu linearisieren. Es werden dabei Terme zweiter und höherer Ordnung vernachlässigt.

$$(1 + m) \cdot \begin{pmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & m & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & m \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

Oft werden für die Berechnung der Parameter, Punkte eines Landesystems verwendet. Diese verebneten Punkte müssen zuerst in ellipsoidische Koordinaten und anschließend in kartesische Koordinaten umgewandelt werden. Die Umwandlung der Landeskoordinaten in ellipsoidische Koordinaten wird mit Hilfe inverser Abbildungsverfahren vollzogen (siehe Kapitel 4).

Die Transformation von ellipsoidischen Koordinaten in kartesische Koordinaten kann mit folgenden Formeln bewerkstelligt werden:

$$c = \frac{a^2}{b}, \quad V = \sqrt{1 + e^2 \cos(B)^2} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} X &= \left(\frac{c}{V} + H \right) \cos(B) \cos(L) \\ Y &= \left(\frac{c}{V} + H \right) \cos(B) \sin(L) \\ Z &= \left[(1 + e^2) \frac{c}{V} + H \right] \sin(B) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Nun kann das funktionale Modell der Ausgleichung aufgestellt werden:

Modellmatrix:

$$A_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_i & 0 & -z_i & y_i \\ 0 & 1 & 0 & y_i & z_i & 0 & -x_i \\ 0 & 0 & 1 & z_i & -y_i & x_i & 0 \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

Unbekanntenvektor:

$$dP^T = (X_0 \ Y_0 \ Z_0 \ m \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z) \quad (3.22)$$

Für jeden Passpunkt wird eine Submatrix A_i aufgestellt und zur Formmatrix A zusammengefasst:

$$A = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_n \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

Der gekürzte Beobachtungsvektor l lässt sich aus dem gemessenen Beobachtungsvektor L (Koordinaten des Zielsystems) und dem gerechneten Beobachtungsvektor L_0 (aus den Ausgangskordinaten, mit Hilfe des genäherten Parametervektors, berechnete Koordinaten im Zielsystem) berechnen:

$$l = L - L_0 \quad (3.24)$$

Berechnung des gekürzten Parametervektors:

$$x = (A^T P A)^{-1} A^T P l \quad (3.25)$$

Im Programm TRANS kann keine Gewichtung der Koordinaten vorgenommen werden, so wird die Gewichtsmatrix P zur Einheitsmatrix.

Der ausgeglichene Parametervektor \hat{X} setzt sich aus dem genäherten Parametervektor X_0 und dem gekürzten Parametervektor x zusammen (Navratil G. 2007):

$$\hat{X} = X_0 + x \quad (3.26)$$

Normalgleichungsmatrix:

$$N = A^T P A \quad (3.27)$$

Berechnung des ausgeglichenen Beobachtungsvektors :

$$\hat{L} = L_0 + A N^{-1} A^T P l \quad (3.28)$$

Bestimmung der Verbesserungen (entsprechen den Klaffungen):

$$v = A \cdot x - l \quad (3.29)$$

Aus der Normalgleichungsmatrix N kann durch Inversion die Kofaktormatrix der Unbekannten Parameter Q_{xx} berechnet werden.

$$Q_{xx} = N^{-1} \quad (3.30)$$

Die empirische Varianz der Gewichtseinheit ergibt sich aus:

$$s_0^2 = \frac{v^T P v}{n_f} \quad (3.31)$$

n_f steht für die Anzahl der Freiheitsgrade.

Nun lässt sich die Kovarianzmatrix der Unbekannten Σ_{xx} bestimmen:

$$\Sigma_{xx} = s_0^2 \cdot Q_{xx} \quad (3.32)$$

Zieht man nun die Wurzel aus den Elementen der Hauptdiagonalen so erhält man die Standardabweichungen der gesuchten Transformationsparameter.

Abschließend soll noch erwähnt werden, dass bei größeren Drehwinkeln die Bestimmung der Parameter schwieriger wird. Statt der vereinfachten Drehmatrix muss im Gleichungssystem 3.17 die Matrix 3.10 eingesetzt werden. Die Gleichung ist dann nach den Unbekannten abzuleiten und man benötigt wieder Näherungswerte für die Bestimmung der Transformationsparameter. Die Näherungswerte können mit Hilfe einer Affintransformation berechnet werden. Für diesen Fall findet man geschlossene Berechnungsformeln bei Horn (1987).

3.5 Transformation zwischen dem zälestischen (ICRS) und dem terrestrischen (ITRS) Referenzsystem

Der Übergang zwischen den beiden Koordinatensystemen soll der Vollständigkeit halber kurz beschrieben werden, wurde aber nicht im Programm TRANS implementiert. Die Transformation erfolgt durch räumliche Drehungen, abhängig von den Erdorientierungsparametern:

$$\vec{r}_{ITRS}(t) = XYUNP \vec{r}_{ICRS}(t) \quad (3.33)$$

mit:

$$P = R_z(-z) \cdot R_y(\vartheta) \cdot R_z(-\zeta) \quad (3.34)$$

$$N = R_x(-(\epsilon + \Delta\epsilon)) \cdot R_z(-\Delta\psi) \cdot R_x(\epsilon) \quad (3.35)$$

$$U = R_z(\Theta_{Gr}) \quad (3.36)$$

$$XY = R_y(-x_p) \cdot R_x(-y_p) \quad (3.37)$$

z, ϑ, ζ	...	Präzessionswinkel
$\Delta\psi, \Delta\epsilon$...	Nutation in Länge und Schiefe
ϵ	...	mittlere Ekliptikschiefe
Θ_{Gr}	...	wahre Sternzeit Greenwich
x_p, y_p	...	Koordinaten der Polbewegung

Zuerst wird der Positionsvektor des himmelfesten System (\vec{r}_{ICRS}) mit der Präzessionsmatrix P multipliziert. Diese Matrix beschreibt die Präzession zwischen der Referenzepoche J2000.0 und dem aktuellen Datum t . Anschließend erfolgt der Übergang vom mittleren zum momentanen wahren Äquator und Frühlingspunkt mit Hilfe der Nutationsmatrix N . Der Übergang auf das rotierende System wird durch eine Drehung um die z-Achse mit dem Winkel Θ_{Gr} vollzogen. Die Polbewegungsmatrizen X, Y beschreiben die Lage des *Central Ephemeris Pole* (CEP) und ermöglichen den Übergang zum *Conventional Terrestrial Pole* (CTP) (Weber R. 2008).

3.6 Transformation zwischen dem ITRF_{YY} und dem österreichischen Landessystem

Zur Veranschaulichung soll ein Satz mittlerer Transformationsparameter zwischen dem ITRF2000 zur Epoche 1997.0 und dem österreichischen Datum MGI angegeben werden:

$$\begin{aligned}
 X_0 &= -577.134 \text{ m} \\
 Y_0 &= -90.223 \text{ m} \\
 Z_0 &= -464.039 \text{ m} \\
 m &= -2.423 \text{ ppm} \\
 \omega_x &= 5.1370 \text{ ''} \\
 \omega_y &= 1.4740 \text{ ''} \\
 \omega_z &= 5.2970 \text{ ''}
 \end{aligned}$$

Hier handelt es sich um gemittelte Parameter für das gesamte österreichische Staatsgebiet. Die Transformationsgenauigkeit liegt daher nur im Bereich von mehreren Metern. Möchte man höhere Genauigkeiten erhalten, so müssen individuelle Transformationsparameter für kleine Gebiete berechnet werden. Die so erhaltenen Parameter können wesentlich von den mittleren Transformationsparametern abweichen (Weber R. 2010). Der Grund liegt in den großen Spannungen des Festpunktfeldes.

Internationale Bezugsrahmen liefern kartesische Koordinaten in einem dreidimensionalen System. Diese Koordinaten sind rein geometrisch definiert und stehen in keinem Zusammenhang zum tatsächlichen Schwerfeld. Mit Hilfe eines Bezugsellipsoides können die kartesischen Koordinaten in ellipsoidische Koordinaten ($L_{ell}, B_{ell},$

H_{ell}) umgerechnet werden. Im österreichischen Gebrauchssystem verwendet man für die Lagekoordinaten, Gauß-Krüger-Koordinaten und für die Höhenkoordinate, orthometrische Höhen (siehe Kapitel 2.5). Um aus der ellipsoidischen Höhe H_{ell} , die in Österreich verwendete orthometrische Höhe H_{orth} ableiten zu können, verwendet man folgende Beziehung:

$$H_{ell} = H_{orth} + N \tag{3.38}$$

N bezeichnet die Geoidundulation (Abstand zwischen dem Geoid und einem Referenzellipsoid). Bei der Berechnung der Transformationsparameter zwischen einem globalen System und dem österreichischen Landessystem ist darauf zu achten, welches Geoid-Undulationsmodell verwendet wird. Je nach Verwendung des einen oder anderen Modells ergeben sich unterschiedliche ellipsoidische Höhen der Passpunkte und dadurch unterschiedliche Transformationsparameter. Umgekehrt bedeutet dies, dass bei Verwendung eines Geoidmodells (für die Interpolation orthometrischer Höhen) immer nur der für dieses Modell gültige Parametersatz für die Transformation verwendet werden darf.

3.7 Transformation zwischen den Referenzrahmen ITRF_{YY} und dem ETRF89

Die Realisierung des ITRF_{YY} besteht aus einer Liste von Stationskoordinaten X_{YY}^I zu einer Standardepoche t_0 und deren Geschwindigkeiten \dot{X}_{YY}^I . Möchte man die Position einer Station zu einer Epoche t berechnen, so kann dies mit folgender Formel erfolgen:

$$X_{YY}^I(t) = X_{YY}^I(t_0) + \dot{X}_{YY}^I \cdot (t - t_0) \tag{3.39}$$

Zur Koordinatentransformation zwischen einem System A und einem System B wird grundsätzlich die 7-Parameter-Transformation verwendet:

$$\begin{pmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T1_{A,B} \\ T2_{A,B} \\ T3_{A,B} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D_{A,B} & -R3_{A,B} & R2_{A,B} \\ R3_{A,B} & D_{A,B} & -R1_{A,B} \\ -R2_{A,B} & R1_{A,B} & D_{A,B} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} \tag{3.40}$$

X_A, Y_A, Z_A ...	Koordinaten im Ausgangssystem A
X_B, Y_B, Z_B ...	Koordinaten im Zielsystem B
$T1, T2, T3$...	Translationsparameter
$R1, R2, R3$...	Rotationsparameter
D ...	Maßstab

Die Transformationsparameter sind linear von der Zeit abhängig:

$$P_{A,B}(t) = P_{A,B}(t_0) + \dot{P}_{A,B} \cdot (t - t_0) \tag{3.41}$$

$P_{A,B}$...	Transformationsparameter
$\dot{P}_{A,B}$...	Änderungsrate eines Transformationsparameters
t, t_0	...	Epochen

In folgender Abbildung sind die Transformationsparameter und deren Änderungsra-
ten zwischen dem ITRF2000 und früheren ITRF-Realisierungen aufgelistet (ITRF
2010):

SOLUTION	T1	T2	T3	D	R1	R2	R3	EPOCH	Ref.
UNITS----->	cm	cm	cm	ppb	.001"	.001"	.001"		IERS Tech. Note #
		
RATES	T1	T2	T3	D	R1	R2	R3		
UNITS----->	cm/y	cm/y	cm/y	ppb/y	.001"/y	.001"/y	.001"/y		
ITRF97	0.67	0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997.0	27
rates	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02		
ITRF96	0.67	0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997.0	24
rates	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02		
ITRF94	0.67	0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997.0	20
rates	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02		
ITRF93	1.27	0.65	-2.09	1.95	-0.39	0.80	-1.14	1988.0	18
rates	-0.29	-0.02	-0.06	0.01	-0.11	-0.19	0.07		
ITRF92	1.47	1.35	-1.39	0.75	0.00	0.00	-0.18	1988.0	15
rates	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02		
ITRF91	2.67	2.75	-1.99	2.15	0.00	0.00	-0.18	1988.0	12
rates	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02		
ITRF90	2.47	2.35	-3.59	2.45	0.00	0.00	-0.18	1988.0	9
rates	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02		
ITRF89	2.97	4.75	-7.39	5.85	0.00	0.00	-0.18	1988.0	6
rates	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02		
ITRF88	2.47	1.15	-9.79	8.95	0.10	0.00	-0.18	1988.0	IERS An. Rep. for 1988
rates	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02		

Abbildung 3.3: Transformationsparameter und deren Änderungsraten

Diese Parameter können direkt in TRANS übernommen werden. Zu beachten ist,
dass die Werte in der richtige Einheit eingegeben werden. Des Weiteren gelten die
Parameter jeweils nur für die angegeben Standardepochen. Möchte man in eine
beliebige Epoche t einer ITRF-Realisierung transformieren, so können eigene Trans-
formationsparameter mit Hilfe der Formel 3.41 berechnet werden.

Der Übergang vom ITRF_{YY} in das ETRF89 kann mittels einer Helmert-Transformation

mit zeitlich abhängigen Parametern erfolgen:

$$X^E(t) = X_{YY}^I(t) + T_{YY} + \begin{pmatrix} 0 & -\dot{R}_{3YY} & \dot{R}_{2YY} \\ \dot{R}_{3YY} & 0 & -\dot{R}_{1YY} \\ -\dot{R}_{2YY} & \dot{R}_{1YY} & 0 \end{pmatrix} X_{YY}^I(t) \cdot (t - 1989.0) \quad (3.42)$$

- $X_{YY}^I(t)$... Koordinaten im ITRF_{YY} zur Epoche t
- $X^E(t)$... Koordinaten im ETRF89 zur Epoche t
- T_{YY} ... Verschiebungskomponenten zwischen ITRF_{YY} und ETRF89
- $\dot{R}_{1YY}, \dot{R}_{2YY}, \dot{R}_{3YY}$... Rotationskomponenten zwischen ITRF_{YY} und ETRF89 pro Jahr

Wie man in der obigen Gleichung erkennt, bleibt die Epoche t durch die Transformation unverändert. Ist der Geschwindigkeitsvektor der Koordinaten bekannt, so können die Koordinaten mit der Formel 3.39 in eine gewünschte Epoche transformiert werden.

Die Verschiebungskomponenten bestehen aus einem globalen konstanten und einem von der Schwerpunktdifferenz abhängigen Anteil. Die Rotationskomponenten beinhalten die Rotationen der gesamten Eurasischen Platte. Für die Verschiebungskomponenten T_{YY} und die Rotationskomponenten pro Jahr \dot{R}_{YY} stehen Schätzwerte für die verschiedenen ITRF-Versionen zur Verfügung (Altamimi Z. et al. 2007):

<i>ITRF</i> _{YY}	<i>T</i> 1 [cm]	<i>T</i> 2 [cm]	<i>T</i> 3 [cm]
89	0	0	0
90	1.9	2.8	-2.3
91	1.9	2.8	-2.3
92	1.9	2.8	-2.3
93	1.9	5.3	-2.1
94	4.1	4.1	-4.9
96	4.1	4.1	-4.9
97	4.1	4.1	-4.9
00	5.4	5.1	-4.8
05	5.6	4.8	-3.7

Tabelle 3.1: Verschiebungskomponenten

$ITRF_{YY}$	$\dot{R}1[mas/y]$	$\dot{R}2[mas/y]$	$\dot{R}3[mas/y]$
89	0.11	0.57	-0.71
90	0.11	0.57	-0.71
91	0.21	0.52	-0.68
92	0.21	0.52	-0.68
93	0.32	0.78	-0.67
94	0.20	0.50	-0.65
96	0.20	0.50	-0.65
97	0.20	0.50	-0.65
00	0.081 ± 0.021	0.490 ± 0.008	-0.792 ± 0.026
05	0.054 ± 0.009	0.518 ± 0.006	-0.781 ± 0.011

Tabelle 3.2: Rotationskomponenten pro Jahr

Mit Hilfe der Formel 3.42 kann nun ein Verschiebungsvektor für den Übergang vom $ITRF_{YY}$ in das ETRF89 berechnet werden. Dieser Vektor kann wiederum als Translationsvektor in TRANS eingeben werden. Dies soll anhand eines kurzen Beispiels gezeigt werden:

Gegeben sind die ITRF2000-Koordinaten (Epoche 1997.0) der Station Graz-Lusbühel:

$$X_{YY}^I = \begin{pmatrix} 4194423.959 \\ 1162702.549 \\ 4647245.328 \end{pmatrix} \quad (3.43)$$

Die Verschiebungs- und Rotationionskomponenten pro Jahr entnimmt man der Zeile für das ITRF2000 aus den Tabellen 3.1 und 3.2. Für die Epochendifferenz zwischen dem ITRF2000 und dem ETRF89 ergeben sich 8 Jahre. Diese Zeitdifferenz wird mit den Rotationskomponenten pro Jahr multipliziert und man erhält die Rotationswinkel. Die Winkel müssen noch mit einem Umrechnungsfaktor ($\rho = \pi/(1000 \cdot 3600 \cdot 180)$) in die Einheit Radiant umgerechnet werden bevor sie in die Rotationsmatrix eingesetzt werden. Die Berechnung erfolgt dann folgendermaßen:

$$\begin{pmatrix} 0.054 \\ 0.051 \\ -0.048 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 6.34 \cdot \rho & 3.92 \cdot \rho \\ -6.3 \cdot \rho & 0 & -0.64 \cdot \rho \\ -3.92 \cdot \rho & 0.64 \cdot \rho & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 4194423.959 \\ 1162702.549 \\ 4647245.328 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0.178 \text{ m} \\ -0.092 \text{ m} \\ -0.124 \text{ m} \end{pmatrix} \quad (3.44)$$

Dieser Vektor kann nun wie zuvor schon erwähnt als Verschiebungsvektor der 7-Parameter-Transformation speziell für den Übergang vom ITRF2000 in das ETRF89 verwendet werden. Weiters stimmen die in diesem Beispiel berechneten Parameter mit jenen, die im Kapitel 5.7.1 verwendet wurden, genähert überein.

In der aktuellen Programmversion von TRANS sind Transformationen zwischen folgenden Referenzrahmen implementiert:

- ITRF2000 (Epoche 1997.0) und ETRF89 (Epoche 1989.0)
- ITRF2000 (Epoche 1997.0) und AREF
- ITRF2000 (Epoche 1997.0) und MGI
- ITRF2000 (Epoche 1997.0) und ITRF89 (Epoche 1988.0)
- ITRF2000 (Epoche 1997.0) und ITRF93 (Epoche 1988.0)

Kapitel 4

Abbildungssysteme

4.1 Konforme Abbildung

Um ebene Koordinaten zu erhalten, muss zuerst vom Sphäroid oder Ellipsoid in die Ebene abgebildet werden. Dies führt jedoch unweigerlich zu Verzerrungen. Bei der Abbildung des Ellipsoides in die Ebene ist es also nicht möglich gleichzeitig Flächentreue, Winkeltreue und Streckentreue zu erhalten. Einzelne Treueigenschaften können aber durch Verwendung geeigneter Abbildungsverfahren berücksichtigt werden. In der Geodäsie verwendet man hauptsächlich konforme (winkeltreue) Projektionen. Dadurch sind die Flächen- und Streckenverzerrungen zumindest von der Richtung unabhängig und leichter handhabbar.

Bei einer konformen Abbildung wird ein infinitesimaler Kreis wieder als Kreis abgebildet. Es werden dazu *isotherme Koordinaten* verwendet. *Isotherm* bedeutet, dass die Parameterlinien orthogonal und isometrisch (streckentreu) sind. Diese Bedingung ist für das Netz der Meridiane ($L = \textit{konstant}$) und Breitenkreise ($B = \textit{konstant}$) eines Ellipsoides nicht erfüllt. Um Isometrie herzustellen, muss die Dichte der Breitenkreise verändert werden (siehe Abbildungen 4.1, 4.2).

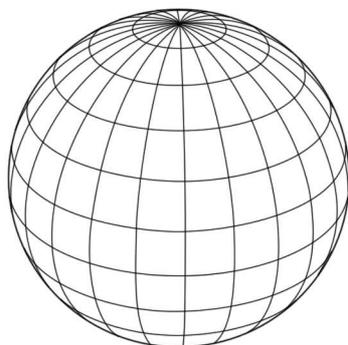


Abbildung 4.1: geodätisches Parameterliniennetz

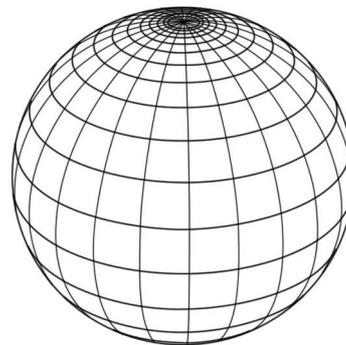


Abbildung 4.2: isothermes Parameterliniennetz

Die konformen Abbildungen lassen sich ausgehend von den *holomorphen Funktionen*, welche die Lösungen der *Cauchy-Riemannsches Differentialgleichungen* darstellen, berechnen.

$$\frac{\partial x}{\partial q} = \frac{\partial y}{\partial L}, \quad \frac{\partial x}{\partial L} = -\frac{\partial y}{\partial q} \tag{4.1}$$

$$x + i \cdot y = f(q + i \cdot L), \quad i = \sqrt{-1} \tag{4.2}$$

Als einfachste Lösung erhält man die *Mercator-Funktion* für die sogenannte *isometrische Breite*.

$$q = \ln \left[\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{B}{2} \right) \cdot \left(\frac{1 - e \sin B}{1 + e \sin B} \right)^{\frac{e}{2}} \right] \tag{4.3}$$

Umgekehrt kann die ellipsoidische Breite B aus der isothermen Breite q durch Iteration berechnet werden:

$$B = 2 \arctan[k \cdot \exp^q] - \frac{\pi}{2}, \quad \text{mit } k = \left(\frac{1 + e \sin B}{1 - e \sin B} \right)^{\frac{e}{2}} \tag{4.4}$$

In der Folge werden die im Programm TRANS implementierten Abbildungsverfahren näher besprochen. Natürlich gibt es noch eine Vielzahl weiterer Projektionsmethoden, welche zum Beispiel in der Kartographie ihre Anwendung finden.

4.2 Die Gauß-Krüger Abbildung (Transversale Mercator Projektion)

Dieses Abbildungssystem ist in vielen Staaten in Verwendung. Auch das österreichische amtliche Koordinatensystem beruht auf dieser Projektion. Ursprünglich wurde

die Abbildung von CARL FRIEDRICH GAUSS hergeleitet und später von verschiedenen Geodäten weiterentwickelt. Einer dieser Geodäten war JOHANN HEINRICH LOUIS KRÜGER. So wurde diese Abbildung in Zentraleuropa unter dem Namen *Gauß-Krüger Projektion* bekannt. Der internationale Name lautet *Transversale Mercator Projektion*.

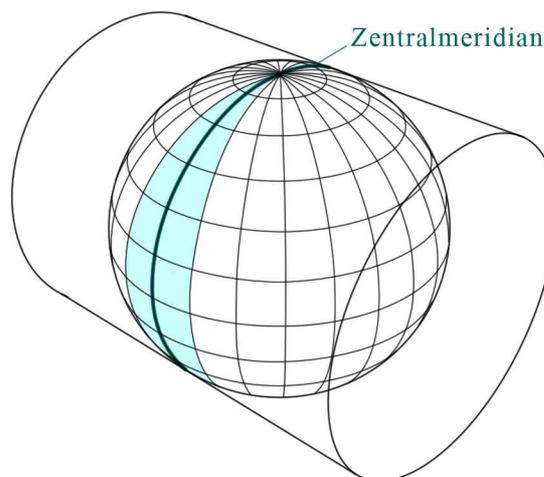


Abbildung 4.3: Transversale Mercator Projektion

Die Charakteristika der Meridianstreifenprojektion:

- Sie ist eine querachsige, konforme Zylinderprojektion
- Meist werden um Verzerrungen klein zu halten nur schmale Streifen westlich und östlich des Zentralmeridians abgebildet. Die Streifenbreite wird von den verschiedenen Staaten unterschiedlich definiert. In Österreich und Deutschland beträgt sie beispielsweise 3° .
- Der Zentralmeridian (Berührmeridian) wird streckentreu abgebildet.
- Die x-Achse wird in den Zentralmeridian gelegt und die y-Achse verläuft entlang des Äquators. Der Ursprung des Abbildungssystems liegt somit im Schnittpunkt von Zentralmeridian und Äquator.
- Die Verzerrung nimmt mit zunehmendem Abstand vom Zentralmeridian zu.

Zu beachten ist, dass es keine strengen Abbildungsformeln für die Gauß-Krüger Projektion gibt. Für die Berechnung werden Näherungsformeln in Reihenform verwendet. Die Abbildung ist aber keineswegs nur auf schmale Zonen oder gemäßigte

Breiten beschränkt. Sie kann auch bis zu den Polen erstreckt werden. Dazu werden aber spezielle Abbildungsformeln benötigt. Reihenentwicklungen dürfen nur für Streifen mit maximaler Breite von 6° verwendet werden. Ansonsten ist der Genauigkeitsverlust durch die Näherungsformeln zu groß. Auch für die Polregionen sind Reihenentwicklungen ungeeignet.

Im Programm TRANS wurden die Formeln von Krüger für die Berechnung verwendet. Diese liefern auch noch in größeren Entfernungen zum Zentralmeridian eine Genauigkeit von wenigen Millimetern. Die Formeln besitzen eine symmetrische Konstruktion. Krüger arbeitete in großem Umfang mit hyperbolischen Funktionen, welche man auch in den Abbildungsgleichungen wiederfindet (Weber R. 2010).

Formeln von Krüger:

Berechnung der ellipsoidischen Konstanten:

$$n = \frac{1 - \sqrt{1 - e^2}}{1 + \sqrt{1 - e^2}}, \quad A = \frac{a}{1 + n} \left(1 + \frac{n^2}{4} + \frac{n^4}{64} \right) \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{n}{2} - \frac{2}{3}n^2 + \frac{37}{96}n^3 - \frac{1}{360}n^4 \\ \beta_2 &= \frac{1}{48}n^2 + \frac{1}{15}n^3 - \frac{437}{1440}n^4 \\ \beta_3 &= \frac{17}{480}n^3 - \frac{37}{840}n^4 \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{n}{2} - \frac{2}{3}n^2 + \frac{5}{16}n^3 + \frac{41}{180}n^4 \\ \gamma_2 &= \frac{13}{48}n^2 - \frac{3}{5}n^3 + \frac{557}{1440}n^4 \\ \gamma_3 &= \frac{61}{240}n^3 - \frac{103}{140}n^4 \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned}
\delta_1 &= 2n - \frac{2}{3}n^2 - 2n^3 + \frac{116}{45}n^4 \\
\delta_2 &= \frac{7}{3}n^2 - \frac{8}{5}n^3 - \frac{227}{45}n^4 \\
\delta_3 &= \frac{56}{15}n^3 - \frac{136}{35}n^4
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Transformation (ellipsoidische Koordinaten $(B, L) \rightarrow$ ebene, kartesische Koordinaten (x, y)):

$$k = \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{B}{2}\right) \cdot \left(\frac{1 - e \sin B}{1 + e \sin B}\right)^{\frac{e}{2}} \tag{4.9}$$

$$b = 2 \arctan(k) - \frac{\pi}{2} \tag{4.10}$$

$$\xi = \arctan(\tan(b) \sec(\Delta L)), \quad \eta = \operatorname{atanh}(\sin(\Delta L) \cos(b)) \tag{4.11}$$

$$x = A[\xi + \gamma_1 \sin(2\xi) \cosh(2\eta) + \gamma_2 \sin(4\xi) \cosh(4\eta) + \gamma_3 \sin(6\xi) \cosh(6\eta)] \tag{4.12}$$

$$y = A[\eta + \gamma_1 \cos(2\xi) \sinh(2\eta) + \gamma_2 \cos(4\xi) \sinh(4\eta) + \gamma_3 \cos(6\xi) \sinh(6\eta)]$$

Inverse Transformation (ebene, kartesische Koordinaten $(x, y) \rightarrow$ ellipsoidische Koordinaten (B, L)):

$$\xi = \frac{x}{A}, \quad \eta = \frac{y}{A} \tag{4.13}$$

$$\xi^* = \xi - \beta_1 \sin(2\xi) \cosh(2\eta) - \beta_2 \sin(4\xi) \cosh(4\eta) - \beta_3 \sin(6\xi) \cosh(6\eta)] \tag{4.14}$$

$$\eta^* = \eta - \beta_1 \cos(2\xi) \sinh(2\eta) - \beta_2 \cos(4\xi) \sinh(4\eta) - \beta_3 \cos(6\xi) \sinh(6\eta)$$

$$b = \arcsin\left(\frac{\sin(\xi^*)}{\cosh(\eta^*)}\right) \tag{4.15}$$

$$B = b + \delta_1 \sin(2b) + \delta_2 \sin(4b) + \delta_3 \sin(6b) \tag{4.16}$$

$$\Delta L = \arctan\left(\frac{\sinh(\eta^*)}{\cos(\xi^*)}\right) \tag{4.17}$$

4.3 Universal Transverse Mercator System (UTM)

Das UTM-System teilt die Erdoberfläche in 60 Zonen, wobei eine Zone eine Ausdehnung von 6° besitzt. Die Nummerierung der Zonen verläuft von Ost nach West von 1 bis 60. Der erste Streifen liegt zwischen 180° und 174° westlich von Greenwich. Österreich wird dabei in die Zonen 32 und 33 abgebildet. Für die Projektion in die Ebene wird wiederum die Gauß-Krüger Abbildung in transversaler Lage benutzt.

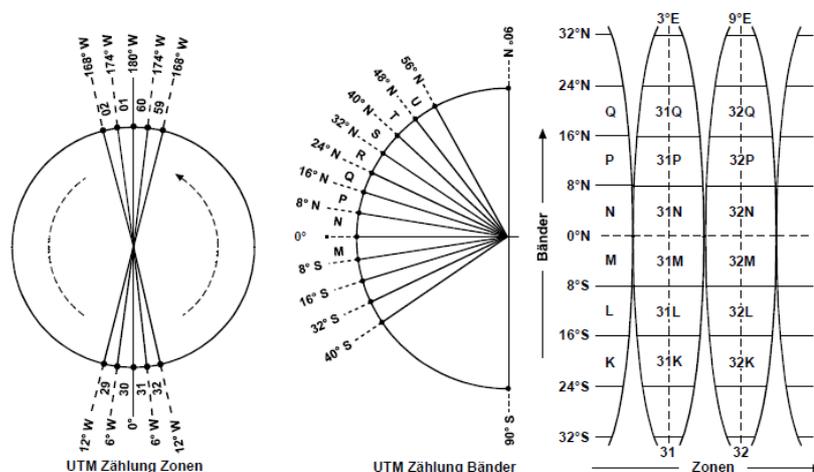


Abbildung 4.4: UTM-System

Um die Verzerrungen an den Streifenrändern möglichst klein zu halten, wird ein Reduktionsfaktor eingeführt. Die x- und y-Koordinate wird mit dem Faktor 0.9996 multipliziert. Die Koordinaten werden dann *Grid Northing* und *Grid Easting* genannt. Durch den Reduktionsfaktor geht die Isometrie (Streckentreue) im Zentralmeridian verloren. Dafür tritt sie aber in 2 Parabelkurven in einer Distanz von $y \approx \pm 180 \text{ km}$ vom Zentralmeridian ein. Die Verzerrungen innerhalb der beiden isometrischen Linien sind negativ und außerhalb positiv. Um ausschließlich positive Koordinaten zu erhalten werden zum *Easting* 500 000 m und zum *Northing* der Südhalbkugel 10 000 000 m addiert. Die Koordinaten heißen dann *False Northing* und *False Easting*.

$$\text{False Northing} = \text{Grid Northing} + 10\,000\,000 \text{ m (nur für Südhalbkugel)}$$

$$\text{False Easting} = \text{Grid Easting} + 500\,000 \text{ m}$$

(4.18)

Der Abbildungsbereich der UTM-Projektion erstreckt sich auf der Nordhalbkugel bis 84° und auf der Südhalbkugel bis -80° Breite. Polgebiete werden in der *UPS-Projektion* (*Universal Polar Stereographic*) abgebildet.

Ein Anwender dieser Projektion ist die NATO. Sie verwendet das WGS84-Ellipsoid

(entspricht de facto dem GRS80-Ellipsoid) gemeinsam mit der UTM-Projektion um militärische Kartenwerke zu erstellen. Auch die Mitgliedsstaaten der EU wollen ihre nationalen Vermessungssysteme und Karten in das EUREF-Datum und die UTM-Abbildung transformieren (Weber R. 2010).

4.4 Die Kegelpjektion von Lambert

Diese konforme Projektion wurde 1772 von JOHANN HEINRICH LAMBERT entwickelt. Heute wird die Kegelpjektion als Basis für internationale Luftfahrt-Kartenwerke sowie für staatliche Kartenwerke benutzt. In Österreich wird sie zum Beispiel als Grundlage für die ÖK 500 000 verwendet.

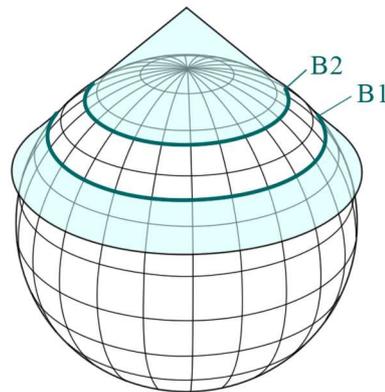


Abbildung 4.5: Lambertsche Kegelpjektion

Die Abbildung erfolgt vom Ellipsoid auf einen Kegel. Die Kegelpchse fällt dabei mit der kleinen Achse des Referenzellipsoids zusammen. Weiters tangiert der Kegel das Ellipsoid entlang eines Breitenkreises oder er schneidet das Ellipsoid entlang zweier beliebig definierbarer Breitenkreise. Diese ausgezeichneten Kreise werden dabei isometrisch abgebildet. Handelt es sich um eine sogenannte *echte Kegelpjektion* so werden die Meridiane als Erzeugende des Kegels und die Parallelkreise des Ellipsoids wieder als Parallelkreise des Kegels abgebildet. Somit sind die Abbilder der Breitenkreise konzentrische Kreise mit der Spitze S des Kugels als Mittelpunkt.

Mit Hilfe der Kegelpjektion kann ein größerer Breitenbereich mit nur kleinen Verzerrungen dargestellt werden.

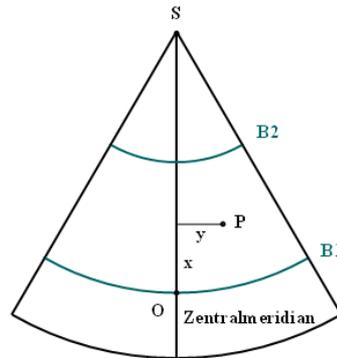


Abbildung 4.6: ausgerollter Kegel

- x, y ... ebene kartesische Koordinaten
- B_1, B_2 ... Breitenkreise in denen sich Kegel und Ellipsoid schneiden
- O ... Ursprung des ebenen Koordinatensystems. Dieser kann als Schnittpunkt eines beliebigen Zentralmeridians mit einem der beiden Breitenkreise gewählt werden.

Abbildungsformeln:

Berechnung der Hilfsgrößen n und A (q bezeichnet die *isometrische Breite* aus der Formel 4.3)

$$V = \sqrt{1 + e'^2 \cdot \cos(B)^2} \tag{4.19}$$

$$n = \frac{\ln\left(\frac{c}{V_1} \cos(B_1)\right) - \ln\left(\frac{c}{V_2} \cos(B_2)\right)}{q_2 - q_1} \tag{4.20}$$

$$A = \frac{c}{n V_1} \cos(B_1) \exp(n \cdot q_1) = \frac{c}{n V_2} \cos(B_2) \exp(n \cdot q_2) \tag{4.21}$$

$$B = \frac{c}{n V_1} \cos(B_1) \tag{4.22}$$

Berechnung der ebenen Koordinaten:

$$\begin{aligned} r &= A \cdot \exp(-n \cdot q), & \theta &= n \cdot (L - L_0) \\ x &= B - r \cdot \cos(\theta), & y &= r \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \tag{4.23}$$

Die Umkehraufgabe ist die Berechnung der Ellipsoidkoordinaten (B, L) aus den ebenen Lambert-Koordinaten (x, y). Zuerst sind wieder die Hilfsgrößen n, A, B zu

berechnen. Daraus ergeben sich mit den Formeln 4.23, r und θ . Somit kann dann L und q bestimmt werden.

$$L - L_0 = \frac{1}{n} \arctan \left(\frac{y}{B - x} \right), \quad r = \frac{B - x}{\cos(\theta)} = \frac{y}{\sin(\theta)}, \quad q = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{A}{r} \right) \quad (4.24)$$

Die ellipsoidische Breite kann dann iterativ aus Gleichung 4.4 gewonnen werden.

Kapitel 5

Programmbeschreibung TRANS

5.1 Allgemeines

Das Programm TRANS wurde entwickelt um Koordinaten zwischen verschiedenen geodätischen Systemen zu transformieren. Einerseits soll zwischen kartesischen-, ellipsoidischen- und ebenen Gauß-Krüger- und Lambert-Koordinaten umgerechnet werden können und andererseits soll der Übergang zwischen verschiedenen geodätischen Lagerungen ermöglicht werden. Als weitere Funktion wurde die Berechnung von Transformationsparametern einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation implementiert. Dabei werden die Parameter einer dreidimensionalen Helmert-Transformation durch eine vermittelnde Ausgleichung bestimmt. Für die Eingabe der Punkte stehen zwei Möglichkeiten zur Auswahl. Erstens, die Punkte können direkt im Programm eingegeben werden oder zweitens, die Koordinaten können aus Textdateien eingelesen werden. Die berechneten Punkte werden zunächst in einer Ausgabetable angezeigt. Sie können anschließend in eine Textdatei gespeichert oder direkt gedruckt werden. Es kann auch ein Berechnungsprotokoll ausgegeben werden, in dem alle wichtigen Parameter einer Transformation stehen.

Ausgehend von einer am Institut vorhandenen Vorgängerversion wurde das Programm von Grund auf neu programmiert. Ein markanter Unterschied der neuen Programmausgabe zur Vorhergehenden liegt im Wechsel der Programmiersprache. Die neue Version wurde mit Hilfe des Programmpaketes MATLAB 7.8.0 (R2009a) erstellt. Die Vorgängerversion mit Delphi.

Wesentliche Neuerungen sind:

- Der Benutzer kann direkt (ohne Zwischenschritte) zwischen den kartesischen-, ellipsoidischen-, Gauß-Krüger- und Lambert-Koordinaten transformieren.
- Die Ein- und Ausgabetablen sorgen für mehr Übersichtlichkeit und Benutzer-

freundlichkeit. Zusätzlich können einmal eingegebene Koordinaten nachträglich bearbeitet werden.

- Das Eingabefenster für Gauß-Krüger Parameter. Hier können die Parameter der Gauß-Krüger Abbildung selbst definiert werden.
- Das Eingabefenster für Lambert-Parameter. Dieses gibt dem Benutzer die Möglichkeit eigene Lambert-Abbildungen zu definieren.

5.2 Hauptmenü

Das Startfenster mit der Bezeichnung *TRANS* ist weitestgehend selbsterklärend (siehe Abbildung 5.1). Es dient als Ausgangspunkt für alle weiteren implementierten Funktionen.

Der Button *Koordinatentransformation* dient zur Transformation zwischen Koordinatensystemen in verschiedenen geodätischen Lagerungen bzw. zur Umrechnung der unterschiedlichen Koordinatentypen (ellipsoidische-, kartesische-, Gauß-Krüger- und Lambert-Koordinaten).

Der Button *Transformationsparameter* dient zur Eingabe, Bearbeitung und Neuberechnung von Transformationsparametern. Jeder Transformationsatz gehört zu einem Referenzrahmen. Standardmäßig implementiert sind die Referenzrahmen ITRF2000, ETRF89, AREF und MGI. Natürlich können diese beliebig erweitert, bearbeitet oder gelöscht werden.

Die Buttons *Ellipsoidparameter*, *Gauß-Krüger-Parameter* und *Lambertparameter* dienen zur Bearbeitung beziehungsweise zur Neudefinition der jeweiligen Parameter.



Abbildung 5.1: Das Hauptmenü dient als Ausgangspunkt für alle weiteren Funktionen.

5.3 Transformation

5.3.1 Allgemeine Einstellungen

Die Eingabe der Punktkoordinaten kann entweder durch manuelle Eingabe oder durch Einlesen einer Textdatei erfolgen. Bei händischer Eingabe ist darauf zu achten, dass keine Leerzeichen in der Punktbezeichnung vorkommen. Wurden alle Eingabefelder (Bezeichnung, Koordinaten und Höhen) korrekt ausgefüllt, so wird der Button *Eingabe* aktiv und der Punkt kann in die Eingabetabelle übernommen werden. Auf diese Art können beliebig viele Punkte in die Tabelle eingegeben werden. Steht eine Punktdatei zur Verfügung, so können die enthaltenen Koordinaten durch den Befehl *Datei – Öffnen* in die Tabelle eingelesen werden. Dies funktioniert allerdings nur, wenn das Programm die Einträge im Header einlesen kann und auch die weitere Formatierung der Textdatei den Programmanforderungen entspricht. Stimmt zum Beispiel der Koordinatentyp im Header mit dem vom Programm erwarteten Typ nicht überein, so erscheint eine Fehlermeldung und das Textfile kann nicht eingelesen werden.

Hier ein Beispiel einer Punktdatei:

Koordinatentyp: ellipsoidisch										
Referenzrahmen: geozentrisch										
Parametersatz: ITRF2000										
Ellipsoid: Erdellipsoid-GRS80										
Geoid: Geoid_87_wgs										
	Bezeichnung	Breite		Länge		ell.Höhe		Und.	orth.Höhe	
1	PP1	48	12	29	15	37	30	319.912	46.912	273.000
2	PP2	48	14	18	15	41	47	290.744	46.744	244.000
3	PP3	48	11	54	15	45	40	273.660	46.660	227.000
4	PP4	48	9	36	15	41	7	336.841	46.841	290.000
5	PP5	48	6	13	15	36	1	371.053	47.053	324.000
6	PP6	48	8	59	15	32	45	326.077	47.077	279.000
7	PP7	48	17	19	15	35	39	398.013	47.013	351.000

Abbildung 5.2: Formatierung einer Punktdatetei

Nach erfolgreicher Eingabe können die Einstellungen des Ausgangs- und Zielsystems gemacht werden. Diese sind je nach Koordinatentyp verschieden. Welche Parameter in den verschiedenen Eingabefenstern eingestellt werden können, wird später noch detailliert beschrieben. Wird eine Punktdatetei eingelesen, so werden die Parameter des Ausgangssystems direkt vom Header übernommen und können vom Benutzer nicht mehr verändert werden. Weiters besteht die Möglichkeit ein Geoidmodell auszuwählen. Dadurch können Undulationswerte für die Punktkoordinaten berechnet werden. Mit Hilfe der Radiobuttons *fixe ellipsoidische Höhe* und *fixe orthometrische Höhe* wird eine der beiden Höhen festgehalten, während die andere mit Hilfe des Undulationswertes berechnet wird. Es gilt der Zusammenhang $H_{ell} = H_{orth} + N$.

Wird zum Beispiel *fixe ellipsoidische Höhe* ausgewählt, so werden die ellipsoidischen Höhen beibehalten und die orthometrische Höhe berechnet. Dies ist zum Beispiel bei GPS-Messungen der Fall, bei welchen anfangs nur ellipsoidische Höhen gemessen werden. Umgekehrt werden bei Auswahl *fixe orthometrische Höhe* die orthometrischen Höhen festgehalten. Diese sind die Höhen der österreichischen Landesvermessung und entstehen bei terrestrischen Messungen.

Zusätzlich kann auch noch eine Geoidbias eingegeben werden. Dies gibt dem Benutzer die Möglichkeit einen gewissen Offset zum ausgewählten Geoidmodell zu addieren. Werden zum Beispiel Punkthöhen mit Hilfe von GNSS-Verfahren bestimmt und gleichzeitig durch ein terrestrisches Nivellement gemessen, so kann ein Offset zwischen den auf unterschiedliche Weise bestimmten orthometrischen Höhen entstehen. Durch Eingabe der sogenannten *Geoidbias* kann dieser Offset berücksichtigt werden.

Ändert man die Ellipsoidparameter des Ausgangssystems, das Geoidmodell oder

die Geoidbias, so werden automatisch die Punkthöhen in der Eingabetabelle korrigiert.

Wurde das Zielsystem ausgewählt und alle Einstellungen gemacht, so kann durch Drücken des Buttons *Berechnen* die Transformation gestartet werden. Die Berechnung wird immer für alle Punkte der Eingabetabelle ausgeführt. Es erscheint ein Ausgabefenster, in welchem die transformierten Koordinaten in einer Tabelle angezeigt werden. Zusätzlich wird eine Liste *Meldungen* ausgegeben. Wurde ein Geoidmodell ausgewählt, so erscheinen in dieser Liste Meldungen für Punkte, die sich außerhalb des Geoidrasters befinden. Das bedeutet: Hat man das Geoidmodell nur im Bereich Österreich gegeben und möchte Punkte außerhalb Österreichs transformieren, so erhält man die Fehlermeldung *Punkt liegt außerhalb des Geoidgrids*.

Für die berechneten Punkte kann eine Ausgabedatei generiert werden, welche in einem Fenster angezeigt, als Textdatei gespeichert oder ausgedruckt werden kann. Ebenso kann ein *Berechnungsprotokoll* angezeigt, gespeichert oder gedruckt werden. Dieses Protokoll gibt eine Übersicht über die vorgenommenen Parametereinstellungen einer Transformation sowie der verwendeten Transformationsätze (siehe Kapitel 5.12).

5.3.2 Das Menü „Eingabe: kartesische Koordinaten“

Bei der Eingabe dieses Koordinatentyps kann zusätzlich zu den kartesischen X , Y , Z -Koordinaten die orthometrische Höhe angegeben werden. Sind die orthometrischen Höhen unbekannt so gibt man den Wert 0 ein. Bei den Einstellungen des Ausgangssystems sind die Lagerung, das bedeutet der Referenzrahmen und der zugehörige Parametersatz auszuwählen. Weiters kann der Benutzer ein Geoidmodell wählen.

Beispiel: Transformation von kartesischen Koordinaten in Ellipsoidkoordinaten.

Die Lagerung ist im Ausgangs- und Zielsystem gleich. Beide Male ist das Koordinatensystem geozentrisch, im System ITRF2000, gelagert. Als Geoidmodell wurde das Geoid mit der Bezeichnung *Geoid_87_wgs* ausgewählt. Zusätzlich wurde für die Höhenbestimmung *fixe orthometrische Höhe* eingestellt. Im Zielsystem wurde für die Ellipsoidparameter das *Erdellipsoid-GRS80* ausgewählt. In diesem Beispiel ändert sich nur der Koordinatentyp, das Datum bleibt gleich.

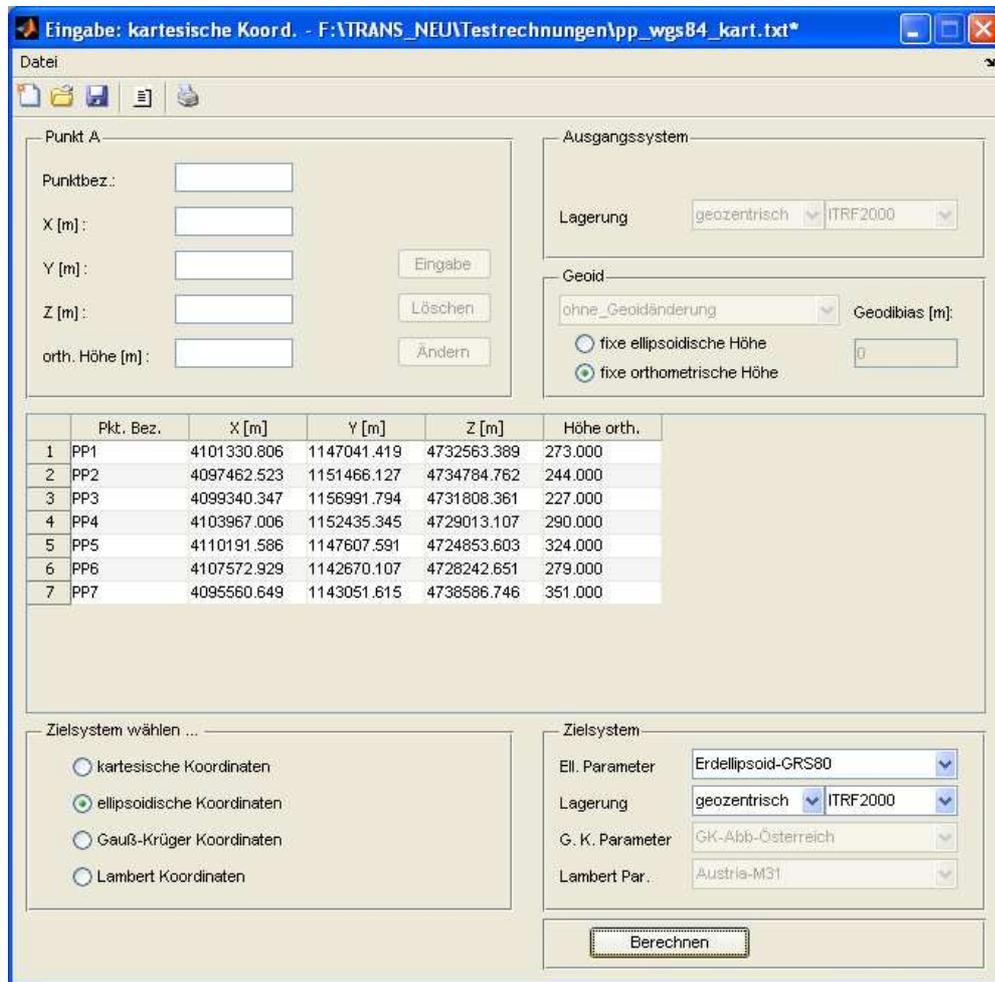


Abbildung 5.3: Menü zur Eingabe kartesischer Koordinaten.

Die Ausgabe der Ellipsoidkoordinaten erfolgt für Breite und Länge in den Einheiten Grad (Altgrad), Minuten und Sekunden. Für die Höhe erhält man zusätzlich zur orthometrischen Höhe, die Undulation und die ellipsoidische Höhe. Da in diesem Fall alle Undulationen korrekt bestimmt werden konnten, wird im Feld *Meldungen*, keine Fehler angezeigt. Die transformierten Punkte sind im Ausgabefenster für Ellipsoidkoordinaten zu sehen:

	Pkt. Bez.	Breite [°]	Breite [']	Breite ["]	Länge [°]	Länge [']	Länge ["]	Höhe ell.	Undulation	Höhe orth.
1	PP1	48	12	28.99998	15	37	29.99998	319.912	46.912	273.000
2	PP2	48	14	18.00002	15	41	46.99999	290.744	46.744	244.000
3	PP3	48	11	54.00001	15	45	39.99999	273.660	46.660	227.000
4	PP4	48	9	36.00000	15	41	7.00001	336.841	46.841	290.000
5	PP5	48	6	12.99999	15	36	1.00000	371.053	47.053	324.000
6	PP6	48	8	59.00002	15	32	44.99999	326.077	47.077	279.000
7	PP7	48	17	19.00001	15	35	39.00002	398.013	47.013	351.000

Meldungen:
keine Fehler

Protokoll anzeigen Protokoll drucken Protokoll speichern Schließen

Abbildung 5.4: Menü zur Ausgabe von Ellipsoidkoordinaten.

5.3.3 Das Menü „Eingabe: Ellipsoidkoordinaten“

Bei diesem Koordinatentyp sind im Ausgangssystem die Ellipsoidparameter und die Lagerung zu definieren. In der Eingabetabelle werden sofort die drei Höhen (ellipsoidische Höhe, Undulation, orthometrische Höhe) angezeigt. Wählt der Benutzer zum Beispiel ein anderes Geoidmodell oder Ellipsoid, so werden die sich ändernden Höhen automatisch in der Tabelle aktualisiert.

Beispiel: Transformation der Ellipsoidkoordinaten in Lambertkoordinaten.

Hier sind die Ellipsoidkoordinaten im Datum des österreichischen Landessystems MGI gegeben und sollen in Lambertkoordinaten desselben Datums umgewandelt werden. Entsprechend dem gewählten Datum wird für die Ellipsoidparameter das *Referenzellipsoid-Bessel* benutzt. Für die Lambert-Parameter im Zielsystem wird die Abbildung *Austria-M31* verwendet.

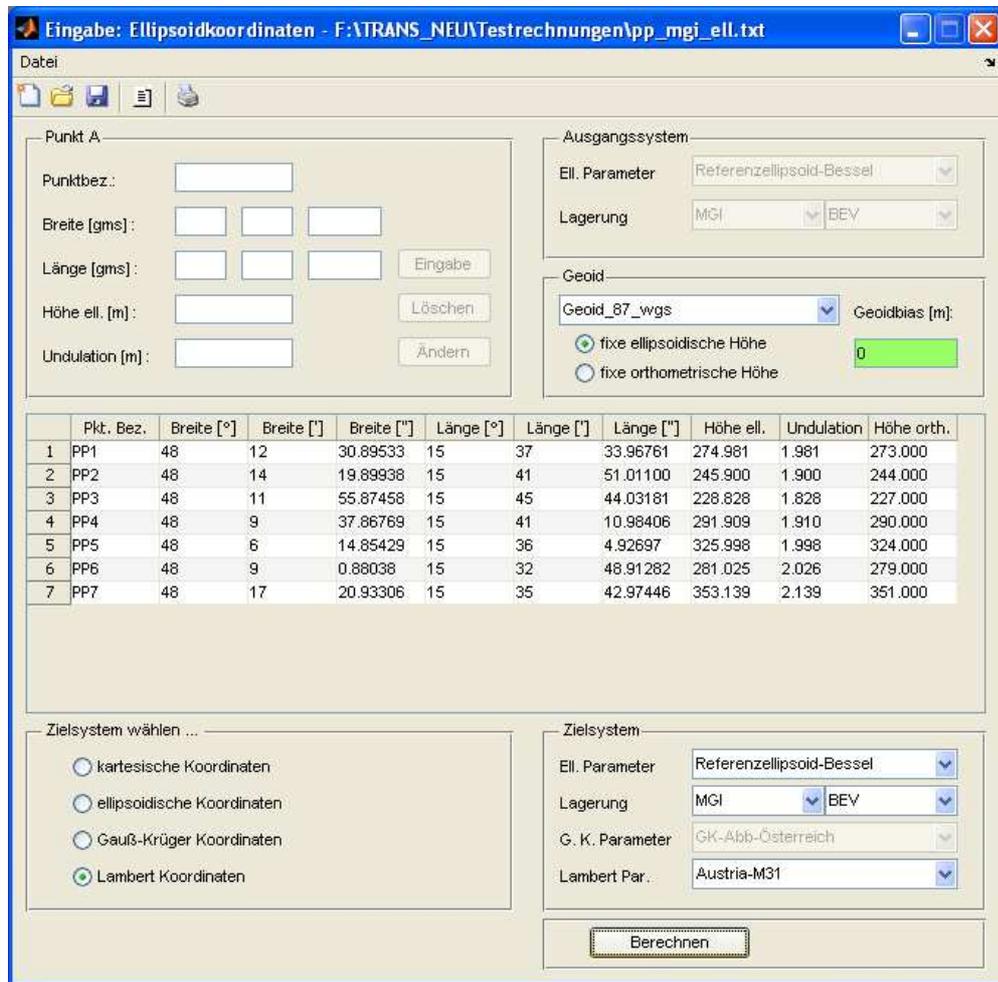
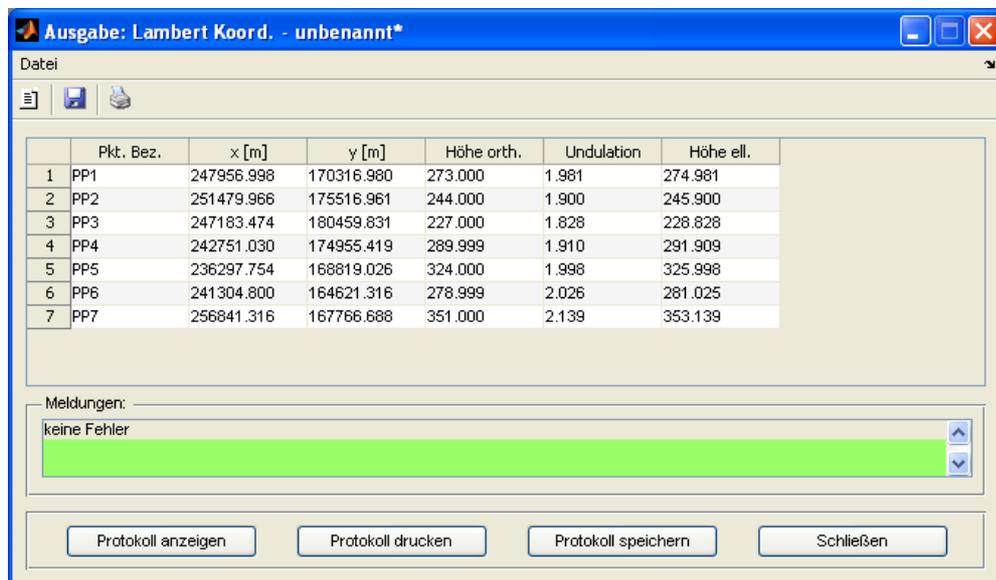


Abbildung 5.5: Menü zur Eingabe von Ellipsoidkoordinaten.

Die transformierten Koordinaten werden dann im Fenster *Ausgabe: Lambert Koordinaten* angezeigt:



	Pkt. Bez.	x [m]	y [m]	Höhe orth.	Undulation	Höhe ell.
1	PP1	247956.998	170316.980	273.000	1.981	274.981
2	PP2	251479.966	175516.961	244.000	1.900	245.900
3	PP3	247183.474	180459.831	227.000	1.828	228.828
4	PP4	242751.030	174955.419	289.999	1.910	291.909
5	PP5	236297.754	168819.026	324.000	1.998	325.998
6	PP6	241304.800	164621.316	278.999	2.026	281.025
7	PP7	256841.316	167766.688	351.000	2.139	353.139

Meldungen:
keine Fehler

Protokoll anzeigen Protokoll drucken Protokoll speichern Schließen

Abbildung 5.6: Menü zur Ausgabe von Lambertkoordinaten.

5.3.4 Das Menü „Eingabe: Gauß-Krüger Koordinaten“

Bei der Eingabe von Gauß-Krüger Koordinaten sind im Ausgangssystem folgende Einstellungen zu treffen:

- Gauß-Krüger Parameter: Diese Parameter definieren verschiedene Gauß-Krüger Abbildungen. Handelt es sich zum Beispiel um österreichische Landeskoordinaten, so wählt man den Parametersatz *GK-Abb-Österreich*.
- Ellipsoidparameter: Hier stehen verschiedene Ellipsoide zur Auswahl. Beispielsweise wählt man für die Gauß-Krüger-Abbildung in Österreich das Bessel-Ellipsoid.
- Lagerung: Hier kann der Benutzer einen Referenzrahmen als auch einen dazugehörigen Transformationsparametersatz auswählen.

Beispiel: Transformation von UTM-Koordinaten in österreichische Gauß-Krüger-Koordinaten.

Bei dieser Transformation wird im Ausgangssystem für die Gauß-Krüger Parameter *UTM* ausgewählt. Weiters wird das für die UTM-Abbildung passende globale Ellipsoid (*Erdellipsoid-GRS80*) eingestellt. Für die Lagerung wurde *geozentrisch* und *ITRF* gewählt. Da es sich in diesem Fall um UTM-Koordinaten handelt, wurde für die eingegebenen Koordinaten, statt des üblichen Zentralmeridianes, eine Zone (33) definiert.

Für das Zielsystem wurden wiederum Gauß-Krüger Koordinaten ausgewählt. Aufgrund des gleichen Koordinatentyps wie im Ausgangssystem kann man wieder die Gauß-Krüger Parameter (*GK-Abb-Österreich*), Ellipsoidparameter (*Referenzellipsoid-Bessel*) und die Lagerung (*MGI, BEV*) definieren. Bei dieser Transformation erfolgt ein Wechsel von der UTM-Projektion auf die österreichische Gauß-Krüger-Abbildung. Weiters wird das Ellipsoid und die Lagerung des Koordinatensystems geändert.

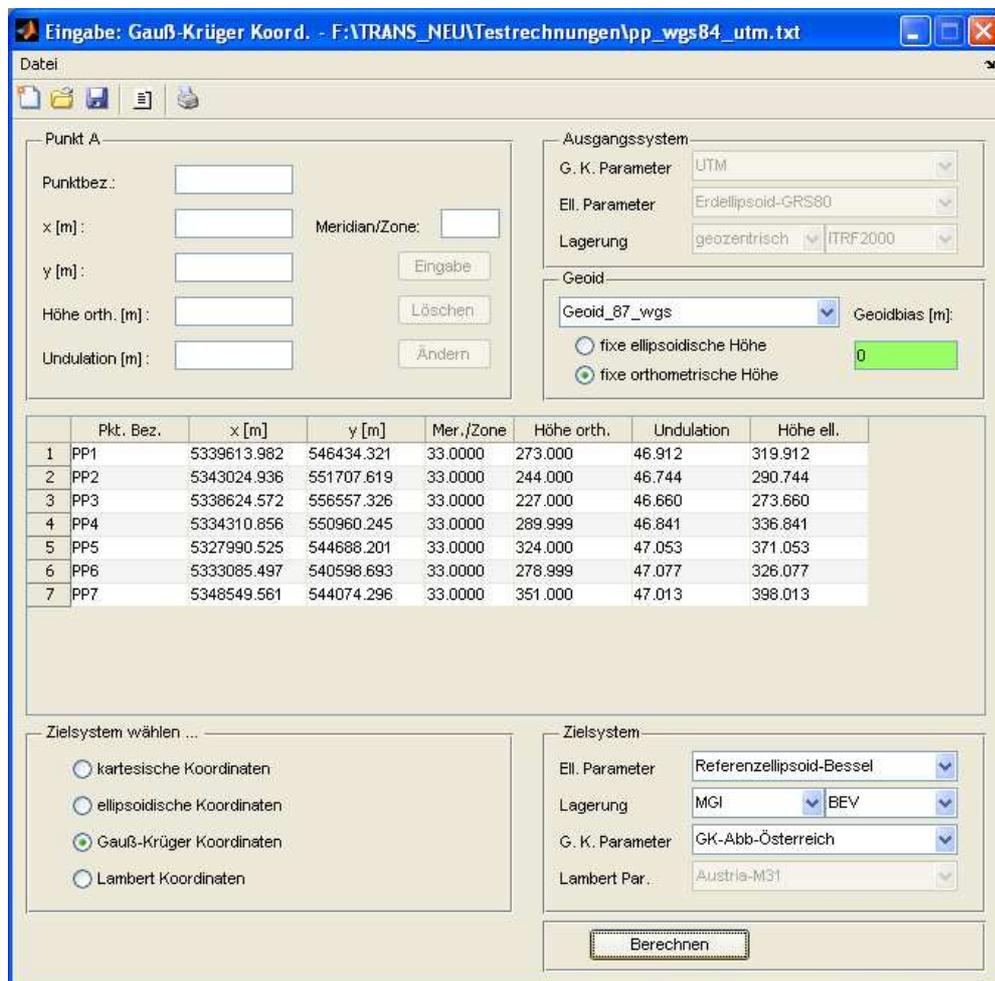


Abbildung 5.7: Menü zur Eingabe von Gauß-Krüger-Koordinaten.

Will man nun die Koordinaten berechnen, muss noch die Art der Meridianstreifenbestimmung ausgewählt werden. Die Gauß-Krüger Koordinaten werden innerhalb von Meridianstreifen mit einem definierten Mittelmeridian abgebildet. Der Mittelmeridian kann automatisch bestimmt werden, oder aber manuell eingegeben werden. Dies ist zum Beispiel nötig, wenn eine Punktwolke genau am Übergang zweier Streifen liegt. In diesem Fall würden die Punkte bei automatischer Berechnung in zwei

verschiedene Streifen abgebildet werden. Gibt man nun manuell den gewünschten Streifen ein, so wird die gesamte Punktwolke in diesem Streifen abgebildet.

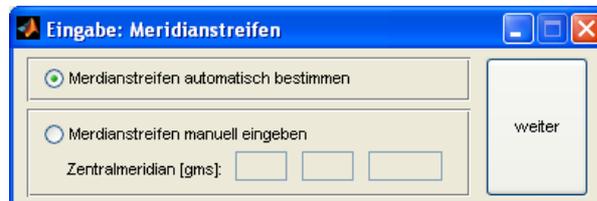


Abbildung 5.8: Menü zur Auswahl der Meridianstreifenbestimmung.

Im letzten Schritt werden die transformierten Koordinaten im Ausgabefenster für Gauß-Krüger Koordinaten angezeigt:

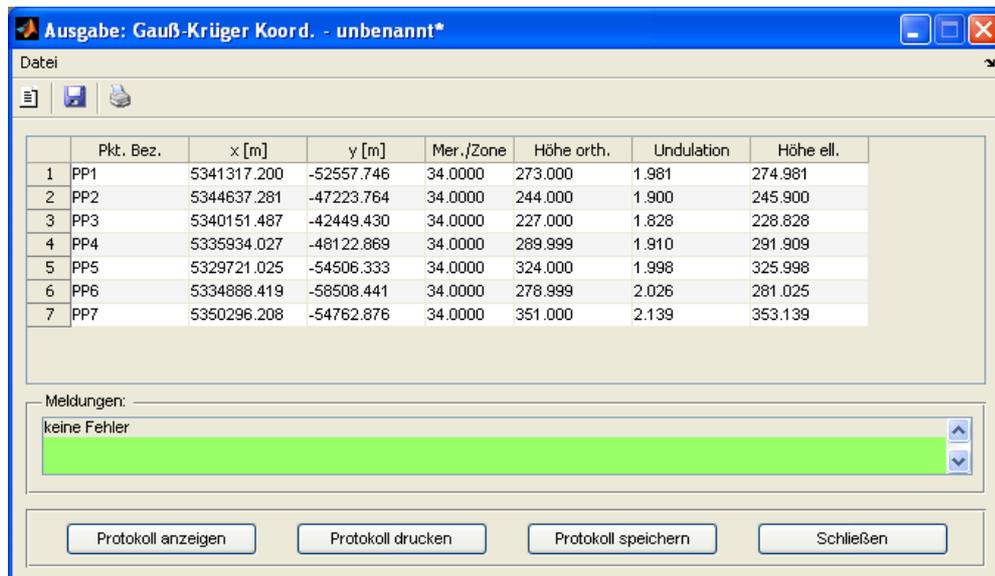


Abbildung 5.9: Menü zur Ausgabe von Gauß-Krüger-Koordinaten.

5.3.5 Das Menü „Eingabe: Lambert Koordinaten“

Bei den Einstellungen des Ausgangssystems sind zusätzlich zu den Ellipsoidparametern und der Lagerung noch die Lambertparameter anzugeben. Die Lambertparameter bestimmen welche Abbildung für die Berechnung verwendet wird. Diese Parameter können ebenfalls vom Benutzer editiert werden (siehe Kapitel 5.5.3). Eingegeben werden die x- und y-Koordinate sowie die orthometrische Höhe und die Undulation. Die Ellipsoidhöhe wird dann automatisch aus den beiden anderen Höhen berechnet.

Beispiel: Transformation der Lambert Koordinaten im System MGI in

geozentrische, kartesische Koordinaten des Systems ETRF89.

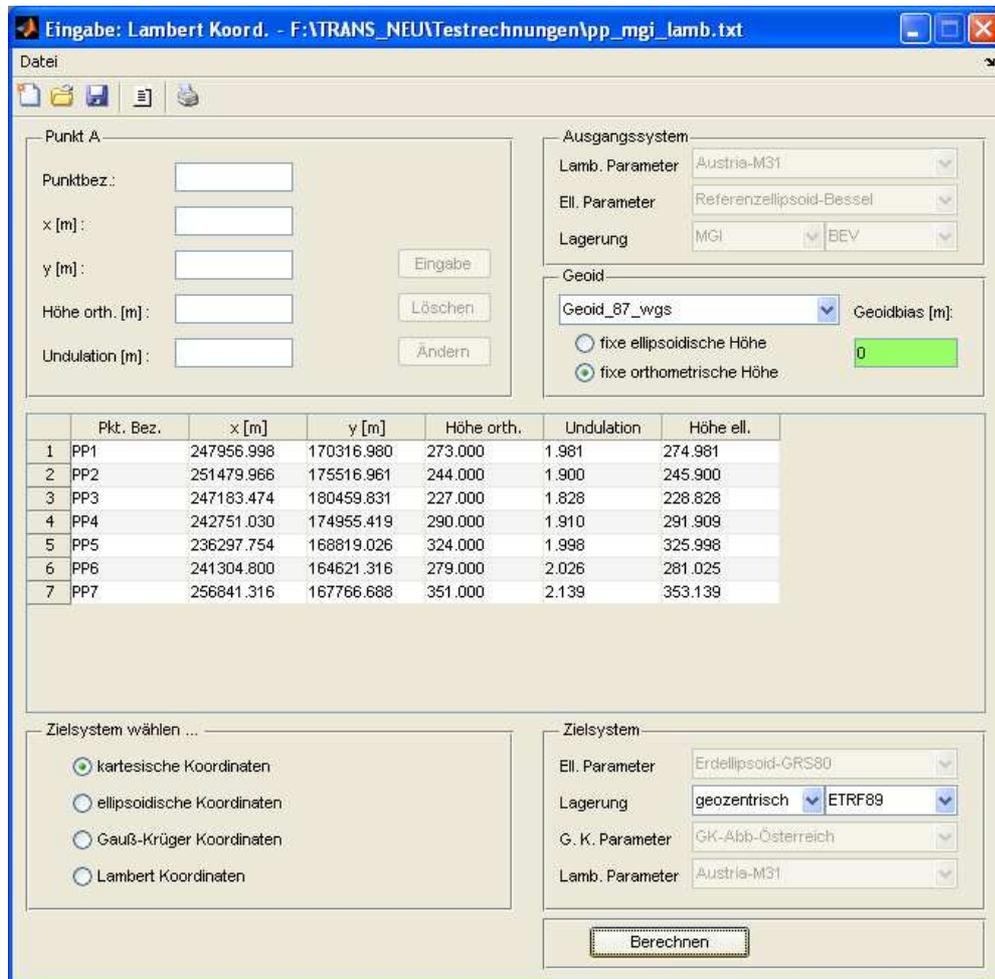
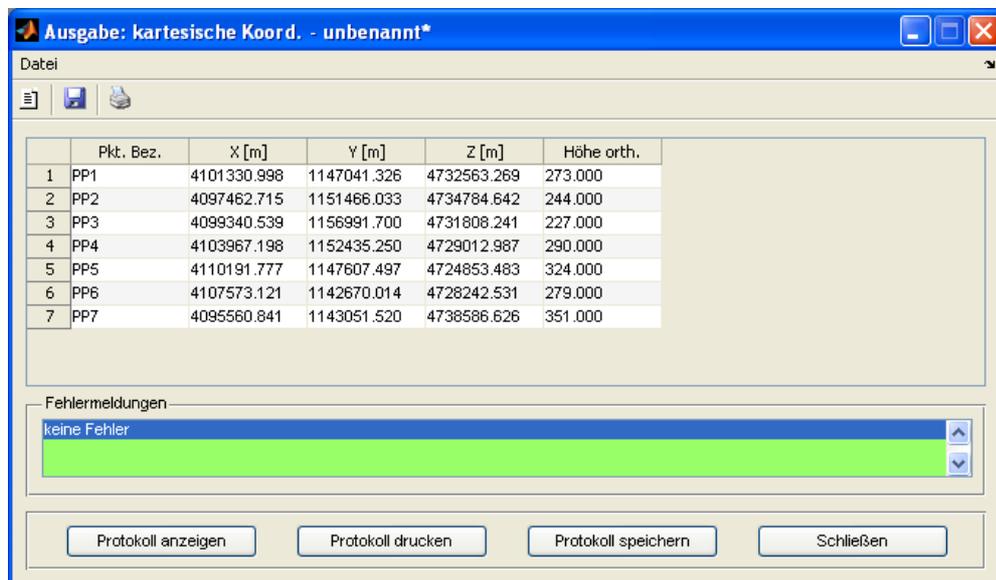


Abbildung 5.10: Menü zur Eingabe von Lambert-Koordinaten.

Angezeigt werden die Koordinaten im Fenster *Ausgabe: kartesische Koordinaten* (siehe Abbildung 5.11).



	Pkt. Bez.	X [m]	Y [m]	Z [m]	Höhe orth.
1	PP1	4101330.998	1147041.326	4732563.269	273.000
2	PP2	4097462.715	1151466.033	4734784.642	244.000
3	PP3	4099340.539	1156991.700	4731808.241	227.000
4	PP4	4103967.198	1152435.250	4729012.987	290.000
5	PP5	4110191.777	1147607.497	4724853.483	324.000
6	PP6	4107573.121	1142670.014	4728242.531	279.000
7	PP7	4095560.841	1143051.520	4738586.626	351.000

Fehlermeldungen
keine Fehler

Protokoll anzeigen Protokoll drucken Protokoll speichern Schließen

Abbildung 5.11: Menü zur Ausgabe von kartesischen Koordinaten.

5.3.6 Das Berechnungsprotokoll

Zu jeder Koordinatentransformation kann ein Berechnungsprotokoll erstellt werden. Dieses Protokoll beinhaltet alle relevanten Informationen zu einer Transformation. Es werden der Koordinatentyp, der Referenzrahmen, der Parametersatz, das Ellipsoidmodell und das Geoid im Ausgangs- und im Zielsystem angegeben. Zusätzlich wird der sogenannte *Transformationspfad* ausgegeben. In diesem Pfad werden alle für die Transformation verwendeten Parametersätze angegeben. Grundsätzlich wird immer von der Ausgangslagerung zuerst in eine geozentrische Lagerung transformiert. Dies ist bei der Verwendung eines Geoidmodelles, zur Bestimmung der Undulationswerte erforderlich (das Geoidmodell ist für eine geozentrische Lagerung des Erdellipsoides GRS80 gegeben). Falls nötig wird dann weiter in ein nicht geozentrisches Zielsystem transformiert. Zum Schluss werden noch die Meldungen, die auch im Ausgabefenster der Koordinatenberechnung erscheinen, in das Berechnungsprotokoll übernommen. Es handelt sich dabei um Warnungen für unbestimmte Geoidundulationen. Dies tritt auf, wenn sich Punkte außerhalb des Geoidrasters befinden.

Zur Veranschaulichung soll an dieser Stelle ein Beispiel für ein Berechnungsprotokoll bei der Umrechnung von geozentrischen Ellipsoidkoordinaten in Lambertkoordinaten des Systems MGI gezeigt werden:

```

*****
Berechnungsprotokoll:
*****

                Ausgangssystem                Zielsystem
Koordinatentyp:  Ellipsoidkoordinaten        Austria-M31
Referenzrahmen:  geozentrisch                MGI
Parametersatz:   ITRF2000                    Österreich
Ellipsoid:       Erdellipsoid-GRS80          Referenzellipsoid-Bessel
Geoid:           Geoid_87_wgs                Geoid_87_wgs

Transformationspfad:
ITRF2000 --> Österreich

Meldungen:
keine Fehler

```

Abbildung 5.12: Beispiel eines Berechnungsprotokolles

5.3.7 Formatierung der Punkdateien

Beschreibung der Headerzeilen

Jede Punkdatei enthält 5 Headerzeilen. Dieser Header beschreibt die Eigenschaften der Koordinaten und Höhen näher.

1. Koordinatentyp: In der ersten Zeile wird der Koordinatentyp beziehungsweise die Bezeichnung der verwendeten Abbildung angegeben. Folgende Typen stehen zur Auswahl:
 - kartesisch
 - ellipsoidisch
 - Bezeichnung der Gauß-Krüger-Abbildung
 - Bezeichnung der Lambert-Abbildung
2. Referenzrahmen: Dieser Rahmen gibt die Lagerung der Koordinaten an. Standardmäßig im Programm implementierte Referenzrahmen sind:
 - ITRF2000 (zur Epoche 1997.0)
 - ETRF89 (zur Epoche 1989.0)
 - AREF

- MGI
3. Parametersatz: Erst durch Angabe eines Parametersatzes kann der Übergang zwischen den unterschiedlichen Referenzrahmen erfolgen. Im Falle des österreichische Bezugssystem MGI verwendet man mehrere Parametersätze (mit geringfügig anderen Parametern). Beispielsweise könnten Parametersätze wie BEV (mittlere Transformation für ganz Österreich), St.Pölten (lokal angepasste Transformation für den Raum um St.Pölten) usw., zur Verfügung stehen.
 4. Ellipsoid: Für die Beschreibung eines geodätischen Datums muss auch ein Ellipsoid definiert werden. Verwendete Ellipsoide sind:
 - Erdellipsoid-GRS80
 - Erdellipsoid-Luzern1967
 - Referenzellipsoid-Bessel
 - Referenzellipsoid-Krassowsky
 - Referenzellipsoid-Hayford
 5. Geoid: Standardmäßig implementierte Geoidmodelle:
 - Geoid_10'15'
 - Geoid_87_wgs
 - Geoid_Ost87_wgs
 - Geoid_West87_wgs

Formatierung der Koordinaten

Jeder Punkt einer Punktdatei besteht aus einer Punktnummer, einer Bezeichnung, den Koordinaten und den Höhen. Bei der Punktbezeichnung ist darauf zu achten, dass maximal 11 Zeichen verwendet werden. Außerdem darf keinesfalls ein Leerzeichen vorkommen, da sonst dieser Punkt nicht eingelesen werden kann. Grundsätzlich werden immer drei Höhen eingelesen:

- ellipsoidische Höhe
- orthometrische Höhe
- Geoidhöhe (Undulation)

Der Zusammenhang $H_{ell} = H_{orth} + N$ muss dabei immer erfüllt sein. Eine Ausnahme gibt es bei den kartesischen Koordinaten. Diese sind unabhängig von einem Ellipsoid und es wird nur zusätzlich die orthometrische Höhe angegeben.

Beispiel einer Punktdatei:

Koordinatentyp: ellipsoidisch										
Referenzrahmen: MGI										
Parametersatz: BEV										
Ellipsoid: Referenzellipsoid-Bessel										
Geoid: Geoid_87_wgs										
	Bezeichnung	Breite			Länge			ell.Höhe	Und.	orth.Höhe
1	PP1	48	12	30.89533	15	37	33.96761	274.981	1.981	273.000
2	PP2	48	14	19.89938	15	41	51.01100	245.900	1.900	244.000
3	PP3	48	11	55.87458	15	45	44.03181	228.828	1.828	227.000
4	PP4	48	9	37.86769	15	41	10.98406	291.909	1.910	290.000
5	PP5	48	6	14.85429	15	36	4.92697	325.998	1.998	324.000
6	PP6	48	9	0.88038	15	32	48.91282	281.025	2.026	279.000
7	PP7	48	17	20.93306	15	35	42.97446	353.139	2.139	351.000

Abbildung 5.13: Formatierung einer Punktdatei

5.4 Transformationsparameter

5.4.1 Das Menü: „Eingabe: Transformationsparameter“

Dieses Menü dient zur Verwaltung der Transformationsparameter. Es können neue Parametersätze eingegeben, bestehende Parametersätze bearbeitet oder neue Parameter berechnet werden.

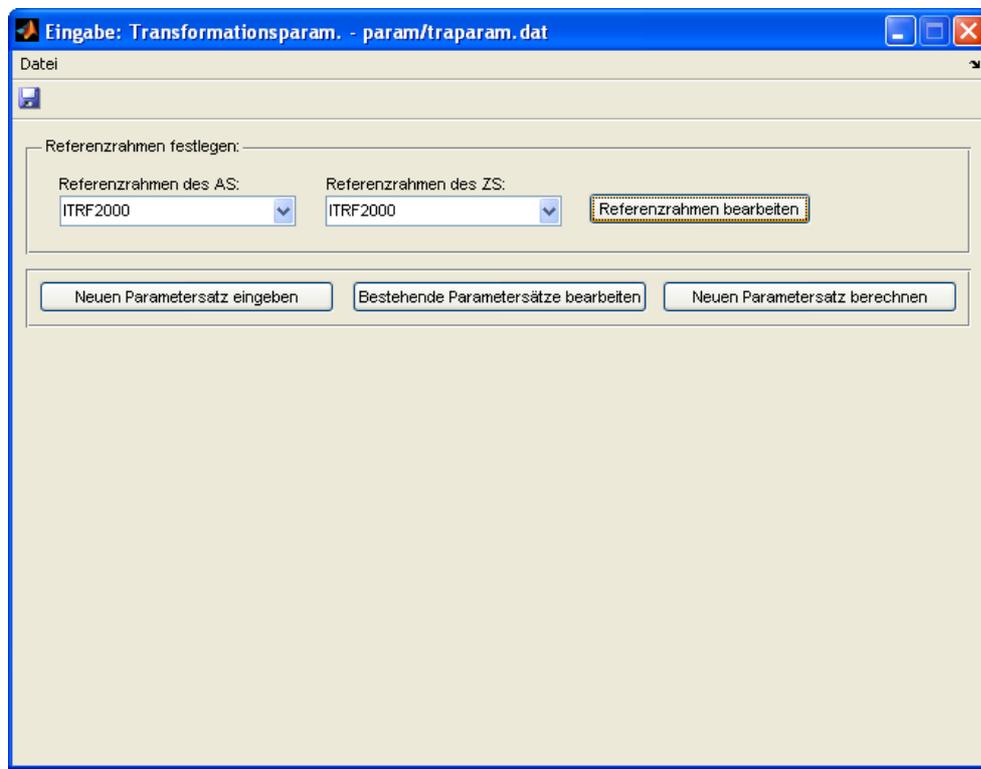


Abbildung 5.14: Menü zur Eingabe von Transformationsparametern.

Zuerst sind die Referenzrahmen im Ausgangs- und Zielsystem festzulegen. Für die Transformation zwischen diesen Referenzrahmen können dann ein oder mehrere Parametersätze definiert werden. Die Referenzrahmen werden durch die Parametersätze realisiert. In diesem Programm unterscheidet man zwischen *globalen* und *lokalen* Referenzrahmen. Die *globalen* Referenzrahmen sind geozentrisch (im Schwerpunkt der Erde) gelagert und unterscheiden sich in der Lagerung nur geringfügig voneinander. Standardmäßig sind die *globalen* Rahmen ITRF2000, ETRF89 und AREF implementiert. Um zwischen diesen Referenzrahmen zu transformieren, kann immer nur ein Transformationssatz eingegeben werden. Weiters wird die Bezeichnung des Transformationssatzes automatisch gleich dem Referenzrahmen, in welchem transformiert wird, gesetzt. Dies soll an einem Beispiel verdeutlicht werden:

Möchte der Benutzer neue Parameter für die Transformation zwischen ITRF2000 und ETRF89 eingeben, so funktioniert das mit dem Button *Neuen Parametersatz eingeben* nur, wenn noch kein Parametersatz ETRF89 eingegeben wurde. Für den Fall, dass der Satz schon existiert, kann er mit dem Button *Bestehende Parametersätze bearbeiten* editiert oder gelöscht werden.

Anders verhält es sich mit *lokalen* Referenzrahmen. Hierbei handelt es sich um Koordinatenrahmen für einzelne Regionen oder Staaten. Ein *lokaler* Referenzrahmen verwendet ein Ellipsoid, welches das Geoid im betreffenden Gebiet bestmöglich

approximiert. Für so einen *lokalen* Referenzrahmen können beliebig viele Parametersätze definiert werden. Zu beachten ist jedoch, dass sie unterschiedliche Bezeichnungen haben müssen und dass keine Transformationen zwischen zwei *lokalen* Referenzrahmen definiert werden können. Wählt der Benutzer beispielsweise für den Referenzrahmen im Ausgangssystem AREF (*globaler* Rahmen) und im Zielsystem MGI (*lokaler* Rahmen), so kann er beliebig viele Parametersätze eingeben.

Die 7-Parameter-Transformation ist durch 3 Translationen, 3 Rotationen und einen Maßstab definiert. Beim Maßstab ist zu beachten, dass nicht der eigentliche Maßstab m sondern die Maßstabskorrektur Δm einzugeben ist. Es gilt: $m = 1 + \Delta m$. Die Maßstabskorrektur wird in *ppm* angegeben.

Unter der Funktion *Bestehende Parametersätze bearbeiten* werden alle Parametersätze, welche für die Realisierung des ausgewählten Referenzrahmens zur Verfügung stehen, in einem Pop-upmenü angezeigt. Wählt man einen Satz aus, so werden die dazugehörigen Parameter angezeigt. Nun können die Parameter geändert oder gelöscht werden. Durch den Button *Eingabe* werden die geänderten Parameter übernommen. Aber Achtung: schließt man das Fenster ohne zu speichern werden die Änderungen wieder verworfen.

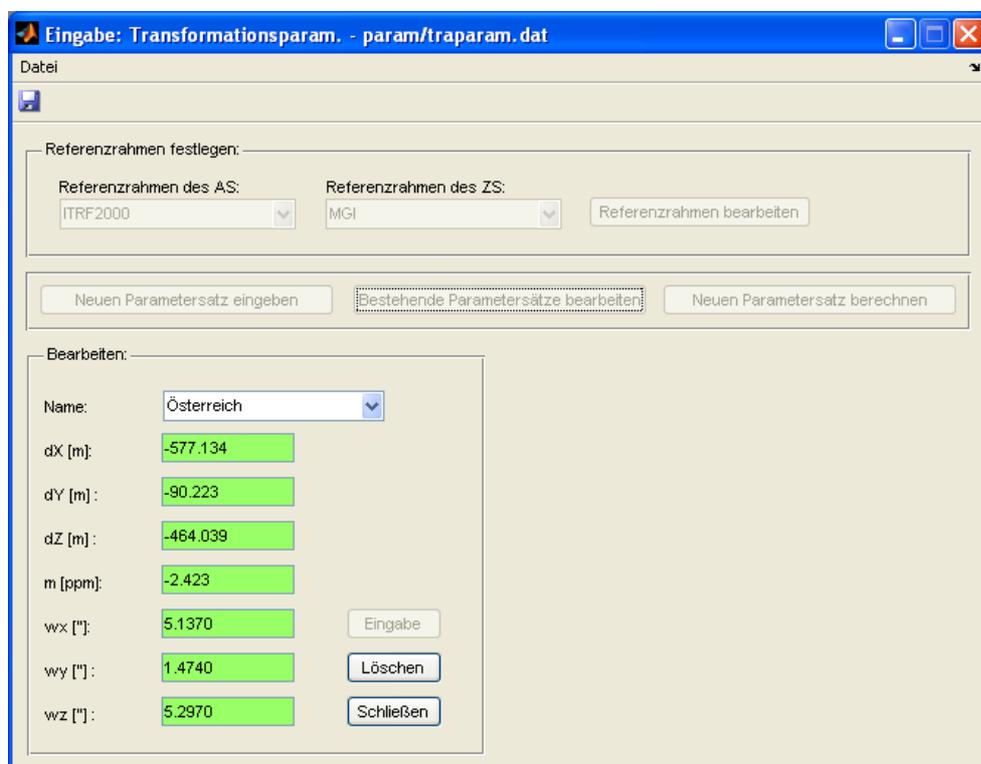


Abbildung 5.15: Menü zum Bearbeiten von Transformationsparametern.

Mit der Funktion *neuen Parametersatz berechnen* wird das Fenster *Berechnung:*

Transformationsparameter geöffnet. Mit Hilfe dieses Menüs können neue Parameter aus Passpunkten berechnet werden (siehe Abbildung 5.17). Beim erstmaligen öffnen des Menüs: *Eingabe: Transformationsparameter* ist dieser Button inaktiv gesetzt. Er wird erst aktiv, sobald ein lokaler Referenzrahmen ausgewählt wurde. Das bedeutet, dass nur für Transformationen in lokale Rahmen Parametersätze berechnet werden dürfen. Berechnete Transformationsparameter können vom Menü *Berechnung: Transformationsparameter* in das Menü *Eingabe: Transformationsparameter* übernommen werden und werden im Panel für neue Parameter angezeigt. Der Benutzer hat nur noch einen Namen für den Parametersatz zu vergeben und den neuen Satz zu speichern. Die Transformationsparameter werden im Ordner *param* in der Datei *traparam.dat* gespeichert und kann zum Beispiel folgendermaßen aussehen:

ITRF2000	ITRF2000	geozentrisch	0	0	0	0	0	0	0
ETRF89	ITRF2000	geozentrisch	0.192	-0.094	-0.120	0	0	0	0
AREF	ITRF2000	geozentrisch	0.005	0.018	-0.007	0	0	0	0
Österreich	ITRF2000	MGI	-577.134	-90.223	-464.039	-2.423	5.1370	1.4740	5.2970
BEV	ITRF2000	MGI	-577.330	-90.130	-463.920	-2.400	5.1354	1.4742	5.2974

Abbildung 5.16: Datei der Transformationsparameter

- | | | |
|---------------|-----|---------------------------------------|
| 1. Spalte | ... | Bezeichnung des Transformationssatzes |
| 2. Spalte | ... | Referenzrahmen des Ausgangssystems |
| 3. Spalte | ... | Referenzrahmen des Zielsystems |
| 4.-6. Spalte | ... | Translationen in ppm |
| 7. Spalte | ... | Maßstab in m |
| 8.-10. Spalte | ... | Rotationen in Sekunden |

5.4.2 Das Menü „Berechnung: Transformationsparameter“

Für die Bestimmung der 7 Parameter einer dreidimensionalen Helmert-Transformation benötigt man mindestens 7 Beobachtungsgleichungen. Da in dieser Programmversion nur Vollpasspunkte verwendet werden, benötigt man also für die Berechnung der Unbekannten mindestens 3 Punkte in beiden Systemen. Die Berechnung erfolgt durch eine vermittelnde Ausgleichung. Die Genauigkeit der gesuchten Parameter wird umso besser, je größer die Überbestimmung ist. Das heißt, umso mehr Passpunkte für eine Berechnung verwendet werden. Für eine Genauigkeitsabschätzung werden noch die Standardabweichungen der Unbekannten und die Klaffungen bestimmt.

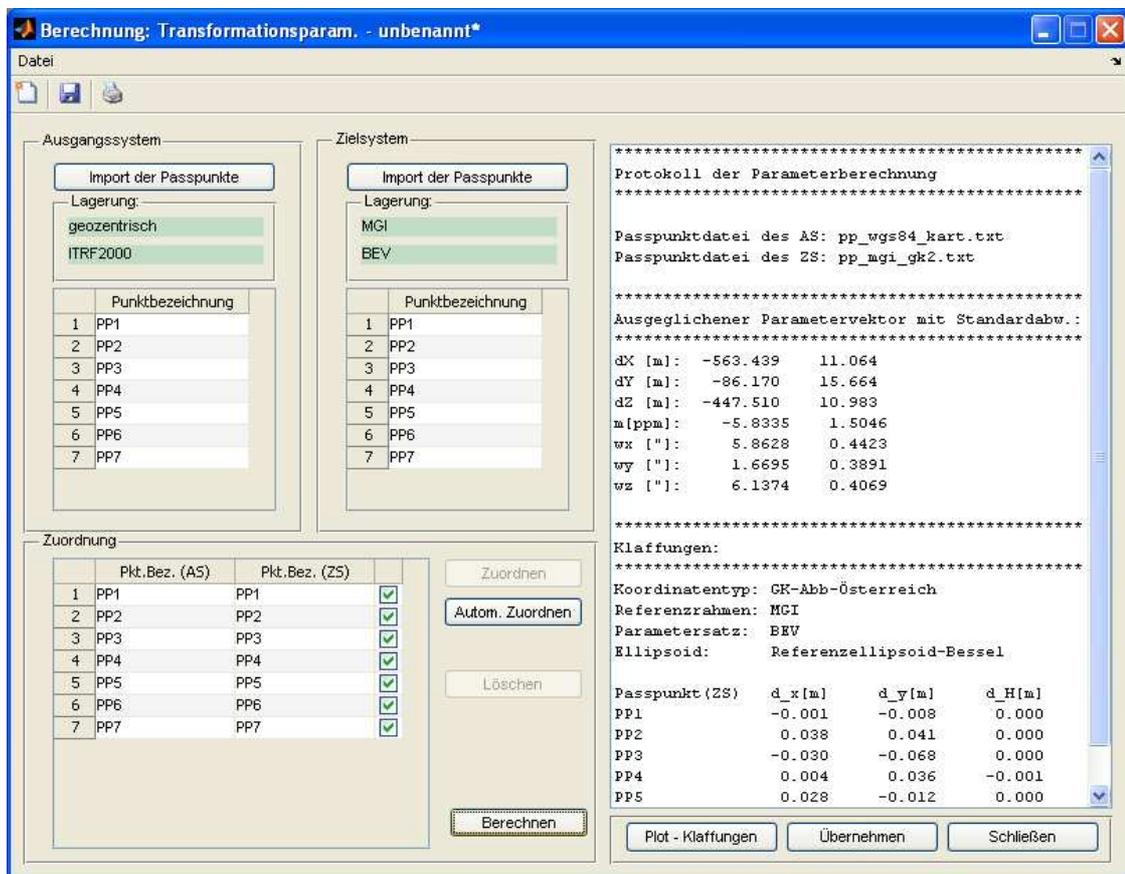


Abbildung 5.17: Menü zur Berechnung der Transformationsparameter.

Der erste Schritt zur Berechnung der Transformationsparameter ist das Einlesen der Passpunkte des Ausgangs- und Zielsystems. Es kann jeder der 4 Koordinatentypen (kartesische, ellipsoidische, Gauß-Krüger oder Lambert-Koordinaten) eingelesen werden. Wurden die Punkte korrekt aus der Textdatei importiert, so werden die Punkte in zwei Tabellen angezeigt. Zusätzlich wird die Lagerung des jeweiligen Systems ausgegeben. Der Benutzer hat darauf zu achten, dass es sich beim Ausgangssystem um eine geozentrische (globale) Lagerung handelt. Beim Zielsystem muss es sich um eine lokale, nicht geozentrische Lagerung handeln.

Als nächster Schritt ist die Zuordnung der Passpunkte vorzunehmen. Es stehen zwei Möglichkeiten zur Auswahl. Erstens kann der Benutzer jeweils einen Punkt in den Tabellen markieren und den Button *Zuordnen* betätigen. Dadurch werden die zusammengehörigen Punkte in die *Zuordnungstabelle* übernommen. Zweitens, kann die Funktion *Autom. Zuordnen* aufgerufen werden. Das Programm ordnet die Punkte anhand identischer Bezeichnungen zu. Jede Zeile der *Zuordnungstabelle* besteht aus den beiden Passpunkten und einem Kästchen. Nur wenn das Kästchen markiert ist werden die Passpunkte für die weitere Berechnung verwendet. Dieses Kästchen

ermöglicht dem Benutzer ein einfaches zu- und wegschalten von Passpunkten. Soll ein Passpunktpaar gelöscht werden, so ist dieses einfach in der Tabelle zu markieren und durch Drücken des Buttons *Löschen* zu entfernen.

Sind die Passpunkte korrekt zugeordnet, so steht der Berechnung der Transformationsparameter nichts mehr im Wege. Wie zuvor schon erwähnt, gibt es keine Trennung in Voll-, Lage- und Höhenpasspunkte. Es werden alle Punkte als Vollpasspunkt behandelt. Als Ergebnis wird ein Protokoll der Parameterberechnung in einem Ausgabefeld angezeigt. Das Protokoll besteht aus den Namen der Passpunktdateien, dem ausgeglichenen Parametervektor, den zugehörigen Standardabweichungen und den berechneten Klaffungen. Die Klaffungen sind die Differenzen zwischen gegebenen und berechneten Koordinaten im Zielkoordinatensystem. Die neu berechneten Koordinaten erhält man durch Anwendung der Transformationsformeln mit den neu berechneten, ausgeglichenen Parametern. Die Klaffungen werden in jenem Koordinatentyp ausgegeben, in welchem die Passpunkte des Zielsystems gegeben sind. Werden beispielsweise die Passpunkte des Ausgangssystems als Ellipsoidkoordinaten und die des Zielsystems als Gauß-Krüger-Koordinaten eingelesen, so werden die Klaffungen im Gauß-Krüger-Format ausgegeben. Für Klaffungen des Typs Gauß-Krüger und Lambert besteht die Möglichkeit sich eine Graphik anzeigen zu lassen (Button *Plot Klaffungen*). Die Klaffungen werden getrennt in Lage und Höhe dargestellt. In grün wird die Verschiebung der Punkte als Lagevektor geplottet. Die Höhenverschiebung wird als senkrechte Linie in orange dargestellt. In der Graphik rechts unten wird der dazugehörige Längenmaßstab angezeigt. Der Maßstab ist für Lage und Höhe gleich. Durch die graphische Darstellung der Klaffungen erkennt man Ausreißer oder Passpunkte mit überdurchschnittlichen Klaffungen sehr schnell. Diese können dann in der *Zuordnungstabelle* deaktiviert oder komplett gelöscht werden. Dann kann eine neue Berechnung erfolgen. Sind die Klaffungen innerhalb der geforderten Grenzwerte so können die Transformationsparameter mit dem Button *Übernehmen* in das Menü *Eingabe: Transformationsparameter* übernommen und dort gespeichert werden. Das Protokoll der Parameterberechnung kann zur Dokumentation gespeichert oder ausgedruckt werden.

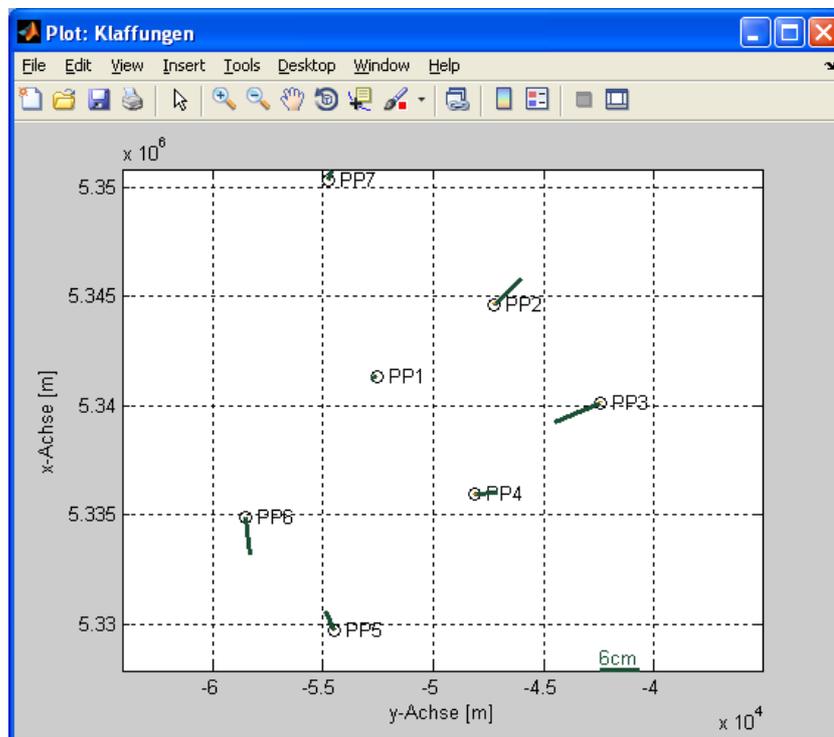


Abbildung 5.18: Fenster zur graphischen Anzeige der Klaffungen.

5.4.3 Das Menü „Referenzrahmen“

Dieses Menü dient zur Verwaltung der Referenzrahmen. Es sind die Bezeichnung, die Art des Rahmens und, falls bekannt, die Epoche anzugeben. Bei der Art des Rahmens ist zwischen *global* und *lokal* auszuwählen. *Global* meint, dass es sich um eine geozentrische Lagerung handelt. *Lokal* bedeutet eine regionale, am besten angepasste Lagerung des verwendeten Ellipsoids an das Geoid. Mit dem Button *Ändern* kann der Benutzer nur die Bezeichnung und die Epoche korrigieren, nicht jedoch die Art des Rahmens. Referenzrahmen können auch gelöscht werden. Die Referenzrahmen werden aber auch in der Datei *traparam.dat* (Datei der Transformationsparameter) verwendet. Dies führt dazu, dass auch jeder Parametersatz in welchem der betroffene Referenzrahmen vorkommt, ebenfalls gelöscht wird. Das Löschen von Referenzrahmen sollte daher nur in Ausnahmefällen durchgeführt werden.

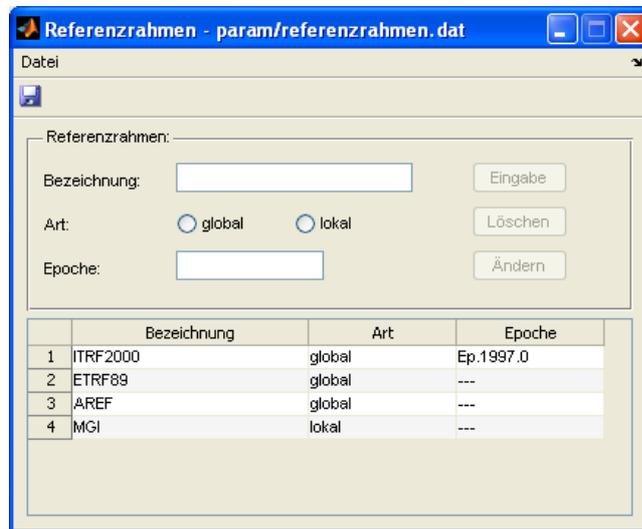


Abbildung 5.19: Menü zum Bearbeiten der Referenzrahmen.

Die Referenzrahmen werden im Ordner *param* in der Datei *referenzrahmen.dat* gespeichert.

5.5 Weitere Parametermenüs

5.5.1 Das Menü: „Eingabe: Ellipsoidparameter“

In diesem Fenster können neue Ellipsoide definiert werden. Dazu sind die Bezeichnung, die große Halbachse a und die kleine Halbachse b einzugeben. Bestehende Ellipsoide können bearbeitet, beziehungsweise gelöscht werden.

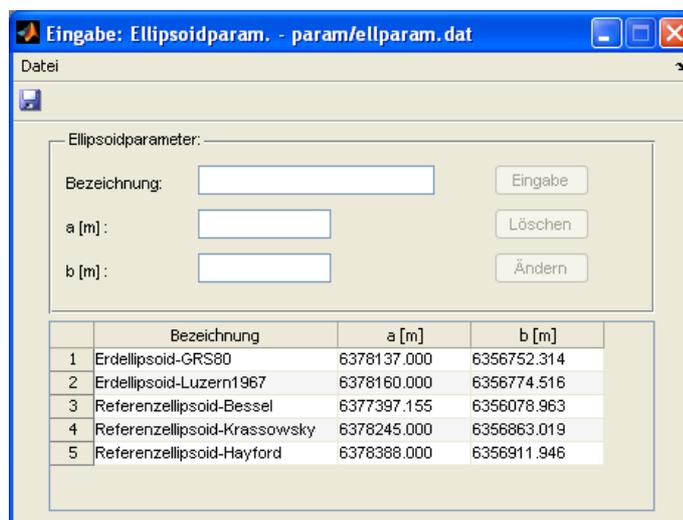


Abbildung 5.20: Menü zur Eingabe der Ellipsoidparameter.

Die Ellipsoidparameter werden im Ordner *param* in der Datei *ellparam.dat* gespeichert. Die Textdatei kann folgendermaßen aussehen:

Erdellipsoid-GRS80	6378137.000	6356752.314
Erdellipsoid-Luzern1967	6378160.000	6356774.516
Referenzellipsoid-Bessel	6377397.155	6356078.963
Referenzellipsoid-Krassowsky	6378245.000	6356863.019
Referenzellipsoid-Hayford	6378388.000	6356911.946

Abbildung 5.21: Datei der Ellipsoidparameter

5.5.2 Das Menü: „Eingabe: Gauß-Krüger-Parameter“

Mit diesem Menü können verschiedene Abbildungsparameter definiert werden. Die Meridianstreifenprojektion, auch Transverse Mercator Projektion genannt, wird in vielen Ländern mit unterschiedlichen Parametern verwendet. Durch die Möglichkeit verschiedene Gauß-Krüger-Abbildungen zu erstellen, kann auf diese Erfordernisse sehr flexibel eingegangen werden.

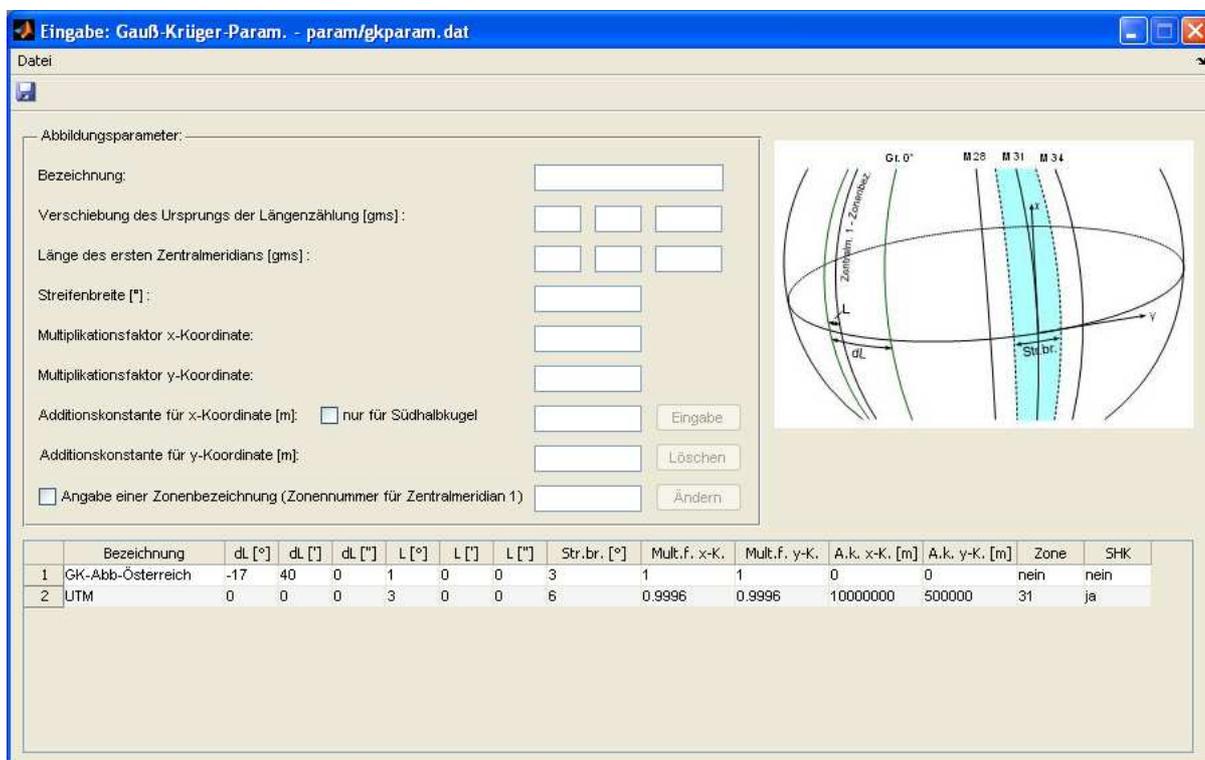


Abbildung 5.22: Menü zur Eingabe der Gauß-Krüger-Parameter.

Kurze Beschreibung der Abbildungsparameter:

- Verschiebung des Ursprungs der Längenzählung: Standardmäßig ist Greenwich als Ursprung definiert. Im österreichischen Landessystem MGI, bezieht sich die Längenzählung aber auf Ferro. Dies hat historische als auch praktische Gründe. Der Nullmeridian wird exakt 20° westlich des Bezugspunktes des astronomischen Observatoriums in Paris angenommen. Daraus ergibt sich, dass der Nullmeridian durch Ferro genau $17^\circ 40'$ westlich von Greenwich liegt. Der Benutzer kann den Ursprung nach den jeweiligen Erfordernissen zwischen -180° und 180° wählen.
- Länge des 1. Zentralmeridians: Ausgehend vom Nullmeridian wird die Länge des ersten Zentralmeridians angegeben.
- Streifenbreite: Die Breite der Meridianstreifen wird in Grad angegeben. Durch die drei Angaben, Verschiebung des Ursprungs der Längenzählung, Länge des 1. Zentralmeridians und durch die Streifenbreite, sind die Meridianstreifen am Ellipsoid festgelegt.
- Multiplikationsfaktor x-Koordinate, y-Koordinate: Diese Faktoren werden eingeführt um die Verzerrungen klein zu halten. Beispielsweise bei der UTM-Abbildung werden die x- und y-Koordinate mit dem Faktor $m = 0.9996$ multipliziert. Dadurch geht aber die Längentreue entlang des Zentralmeridians verloren. Dafür entsteht in zwei parallelen Kurven zum Zentralmeridian Isometrie. Man erhält zwischen den beiden Linien eine negative und außerhalb der Linien eine positive Verzerrung.
- Additionskonstante für x- und y-Koordinate: Diese Konstanten werden zu den Koordinaten addiert um negative Vorzeichen zu vermeiden. Nimmt man wieder die UTM-Abbildung als Beispiel, so wird, auf der südlichen Hemisphäre, ein konstanter Wert von $1\,000\,000$ m zur Nord-Koordinate addiert und zur Ost-Koordinate ein Wert von $500\,000$ m hinzugefügt. Soll, wie bei der UTM-Abbildung, die Additionskonstante in x-Richtung nur für Bereiche der Südhalbkugel addiert werden, so ist bei den Abbildungsparametern das Kästchen *nur für Südhalbkugel* zu markieren.
- Angabe einer Zonenbezeichnung (Zonennummer für Zentralmeridian 1): Will man anstatt des Zentralmeridians eine Zonennummer für die Meridianstreifen definieren, so ist dieses Kästchen zu markieren und die gewünschte Zonennummer für den ersten Zentralmeridian anzugeben. Für die UTM-Abbildung ist die Zonennummer des ersten Zentralmeridians 31.

Die Gauß-Krüger-Parameter werden im Ordner *param* im Verzeichnis *gkparam.dat* gespeichert. Die Datei kann folgendermaßen aussehen:

GK-Abb-Ö	-17	40	0	1	0	0	3	1	1	0	0	nein	nein
UTM	0	0	0	3	0	0	6	0.9996	0.9996	10000000	500000	31	ja

Abbildung 5.23: Datei der Gauß-Krüger Parameter

5.5.3 Das Menü: „Eingabe: Lambertparameter“

Dieses Fenster dient zur Eingabe von Parametern der Lambert-Abbildung. Es können die beiden Breitenkreise, welche durch den Schnitt eines Kegels mit einem Ellipsoid entstehen, eingegeben werden. Ebenso wie bei der Gauß-Krüger-Abbildung muss auch hier die geographische Länge des Zentralmeridians definiert werden.

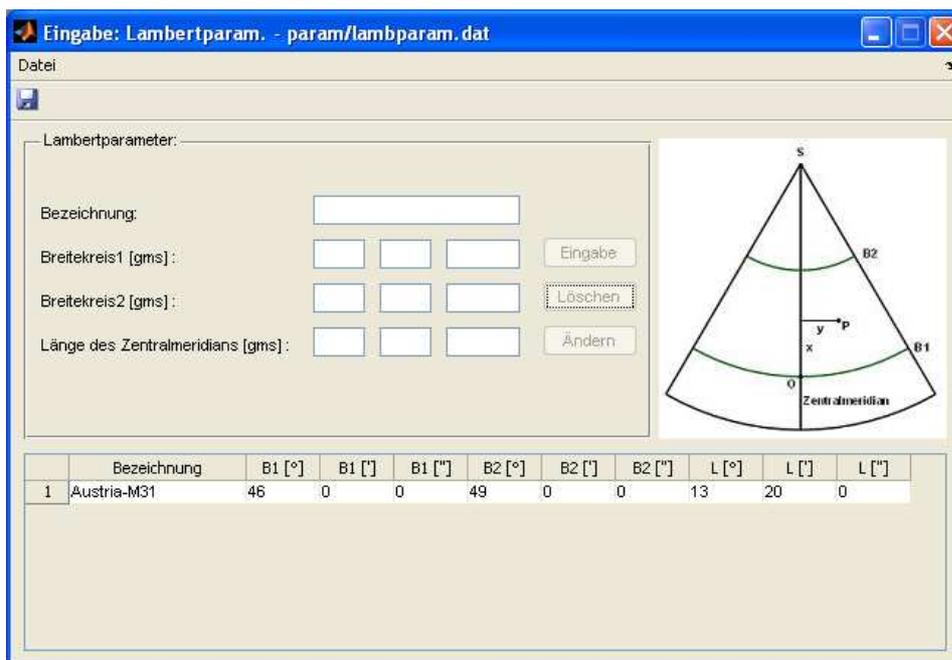


Abbildung 5.24: Menü zur Eingabe der Lambert-Parameter.

Die Parameter werden im Ordner *param* mit der Bezeichnung *lambparam.dat* gespeichert. Die Datei kann beispielsweise so aussehen:

Austria-M31	46	0	0	49	0	0	13	20	0
-------------	----	---	---	----	---	---	----	----	---

Abbildung 5.25: Datei der Lambert-Parameter

- | | | |
|---------------|-----|--|
| 1. Spalte | ... | Bezeichnung der Abbildung |
| 2.-4. Spalte | ... | 1. Breitenkreis in Grad, Minuten und Sekunden |
| 5.-7. Spalte | ... | 2. Breitenkreis in Grad, Minuten und Sekunden |
| 8.-10. Spalte | ... | Länge des Zentralmeridians in Grad, Minuten und Sekunden |

5.6 Geoidmodelle

Einfügen eines neuen Geoidmodelles:

Die Geoidmodelle können unter einer speziellen Formatierung in einer *bin*- oder *txt*-Datei gespeichert werden. Diese Dateien werden im Ordner *geoid* abgelegt. Zusätzlich existiert eine zweite Datei im Ordner *param* mit der Bezeichnung *geoid.dat*. Diese Datei hat zum Beispiel folgendes Aussehen:

ohne_Geoidänderung	-
Geoid_10'15'	geoid/G10M15M.BIN
Geoid_87_wgs	geoid/geoid87_wgs.bin
Geoid_Ost87_wgs	geoid/ost87_wgs.bin
Geoid_West87_wgs	geoid/west87_wgs.bin

Abbildung 5.26: Datei: *geoid.dat*

In der ersten Spalte steht der Name mit welchem das Geoidmodell im Programm angezeigt wird. In der zweiten Spalte befindet sich der Pfad zur eigentlichen Geoiddatei. Will man ein neues Modell einfügen so ist erstens eine speziell formatierte Datei mit den Geoidundulationen im Ordner *geoid* abzuspeichern und zweitens ein geeigneter Anzeigename und der Dateipfad in der Datei *geoid.dat* zu ergänzen.

Formatierung einer Geoiddatei:

Die Geoidundulationen sind in einem Raster gegeben. Dieses Raster hat eine bestimmte Nord-Süd- und West-Ost-Ausdehnung. Außerdem sind die Undulationswerte in einem bestimmten Abstand $d\phi$ und $d\lambda$ gegeben. Dieses Raster wird durch die ersten 18 Zeilen definiert. Die Begrenzungen des Rasters sind in geographischen Koordinaten gegeben. Die Undulationswerte wurden für das Erdellipsoid-GRS80 in geozentrischer Lagerung berechnet.

Nachfolgend sind die ersten Zeilen der Datei *geoid87_wgs.bin* gegeben:

```
46 ... südliche Begrenzung des Geoidrasters in Grad, Minuten und Millisekunden
26
0
48 ... nördliche Begrenzung des Geoidrasters in Grad, Minuten und Millisekunden
58
1
9 ... westliche Begrenzung des Geoidrasters in Grad, Minuten und Millisekunden
31
1
17 ... östliche Begrenzung des Geoidrasters in Grad, Minuten und Millisekunden
9
0
0 ... Breitendifferenz der Rasterpunkte in Grad, Minuten und Millisekunden
2
0
0 ... Längendifferenz der Rasterpunkte in Grad, Minuten und Millisekunden
2
0
47678 ... Undulationswert in mm
47677
47676
47675
```

Abbildung 5.27: Datei der Geoidundulationen

Jedem Rasterpunkt wird ein Undulationswert zugeordnet. Der erste Wert (*47678*) befindet sich in der linken oberen Ecke. Die weiteren werden dann zeilenweise angeordnet.

Zur Veranschaulichung wurde eine Darstellung des Geoidmoells *Geoid_10'15'* angefertigt:

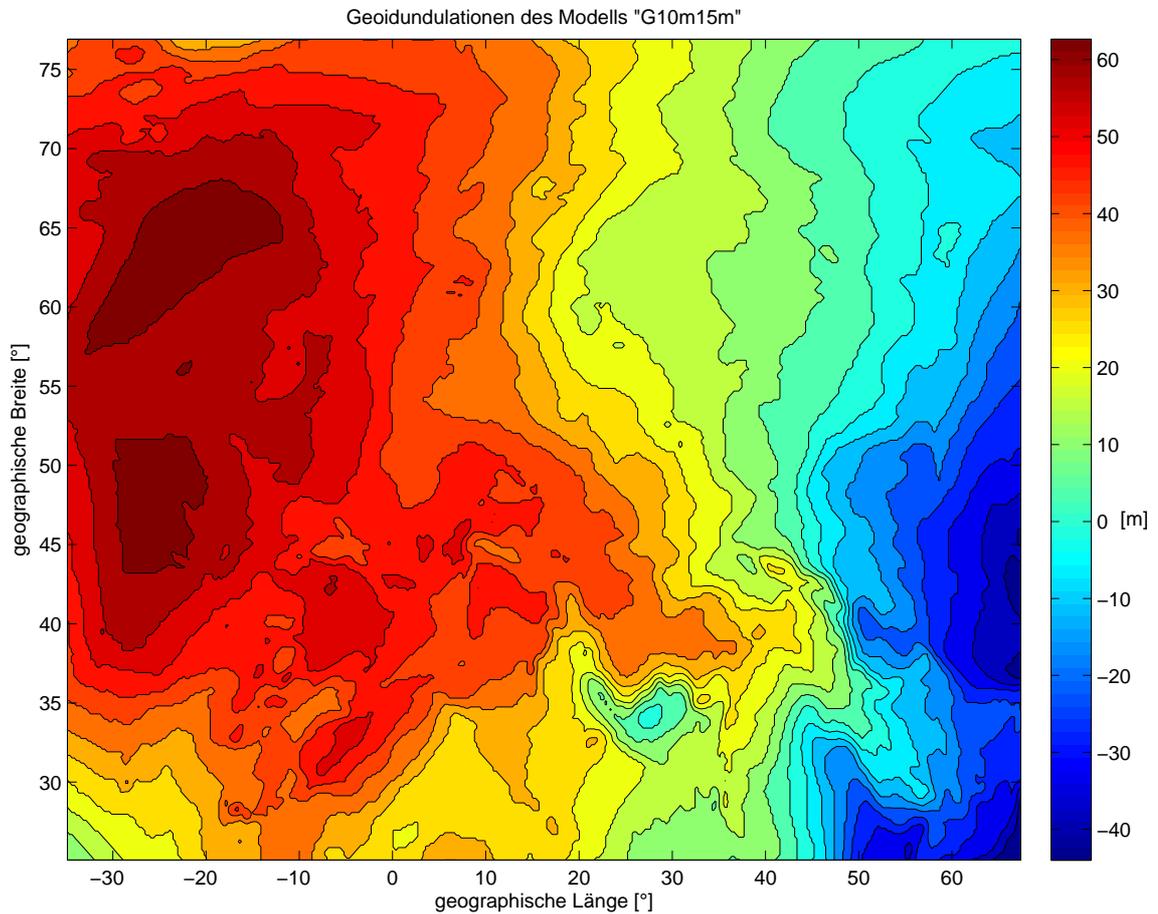


Abbildung 5.28: Geoidmodell

5.7 Anwendungsbeispiele

5.7.1 Abschätzung einer Plattenverschiebung mit Hilfe von Koordinatentransformationen

Anhand dieses Beispiels soll die Plattenverschiebung der Eurasischen Platte aufgezeigt werden. Wie schon im Kapitel 2.4.1 beschrieben bewegt sich diese mit ca. 2.5 cm pro Jahr in Richtung Nord-Osten.

Für die Berechnungen wurden die Koordinaten von 5 Fundamentalstationen des ITRF2000 verteilt über ganz Europa verwendet. Diese wurden der Homepage des International Terrestrial Reference Frame (ITRF) entnommen. Es handelt sich um

die Stationen Grasse (GRAS), Onsala (ONSA), Graz-Lustbühel (GRAZ), Sofia (SOFI) und Riga (RIGA):



Abbildung 5.29: Fundamentalstationen des ITRF2000

Vorerst wurden die kartesischen ITRF2000 Koordinaten mit Hilfe von TRANS in UTM-Koordinaten transformiert.

Koordinatentyp: UTM							
Referenzrahmen: geozentrisch							
Parametersatz: ITRF2000							
Ellipsoid: Erdellipsoid-GRS80							
Geoid: ohne_Geoidänderung							
	Bezeichnung	x	y	Mer./Zone	orth.Höhe	Und.	ell.Höhe
1	GRAS	4846733.877	332596.749	32.0000	0.000	1319.309	1319.309
2	ONSA	6365172.153	675798.240	32.0000	0.000	45.566	45.566
3	GRAZ	5212742.077	537469.895	33.0000	0.000	538.295	538.295
4	SOFI	4714301.105	696594.733	34.0000	0.000	1119.536	1119.536
5	RIGA	6315516.302	321112.236	35.0000	0.000	34.716	34.716

Abbildung 5.30: Ausgabedatei der verebneten ITRF2000-Koordinaten

Da in diesem Beispiel kein Geoid-Undulationsmodell verwendet wird, ergeben sich bei der Berechnung der UTM-Koordinaten für die orthometrische Höhe sowie für die Undulationen rein theoretische Werte. Für die weitere Berechnung ist ausschließlich die ellipsoidische Höhe von Bedeutung und die offensichtlich falschen Werte für die orthometrischen Höhen sowie für die Undulationen können vernachlässigt werden. Dies gilt für die verebneten ITRF2000-Koordinaten als auch für die verebneten ETRF89-Koordinaten.

Weiters wurden die ITRF-Koordinaten in das europäische System (ETRS89) transformiert. Für den Übergang vom ITRF2000 ins ETRF89 wurde ein genäherter

Transformationsparametersatz verwendet:

$$\begin{aligned} X_0 &= 0.192 \text{ m} \\ Y_0 &= -0.094 \text{ m} \\ Z_0 &= -0.120 \text{ m} \\ m &= 0 \text{ ppm} \\ \omega_x &= 0 \text{ ''} \\ \omega_y &= 0 \text{ ''} \\ \omega_z &= 0 \text{ ''} \end{aligned}$$

Zusätzlich zu dieser Datumstransformation wurden die transformierten Koordinaten in das UTM-System abgebildet:

Koordinatentyp: UTM							
Referenzrahmen: geozentrisch							
Parametersatz: ETRF89							
Ellipsoid: Erdellipsoid-GRS80							
Geoid: ohne_Geoidänderung							
	Bezeichnung	x	y	Mer./Zone	orth.Höhe	Und.	ell.Höhe
1	GRAS	4846733.669	332596.627	32.0000	0.000	1319.356	1319.356
2	ONSA	6365171.941	675798.117	32.0000	0.000	45.555	45.555
3	GRAZ	5212741.877	537469.755	33.0000	0.000	538.316	538.316
4	SOFI	4714300.918	696594.576	34.0000	0.000	1119.557	1119.557
5	RIGA	6315516.129	321112.064	35.0000	0.000	34.690	34.690

Abbildung 5.31: Ausgabedatei der verebneten ETRF89-Koordinaten

Mit Hilfe der in den beiden Referenzsystemen berechneten ebenen UTM-Koordinaten konnten 2-D Verschiebungsvektoren der Ebene sowie ellipsoidische Höhenänderungen berechnet werden (siehe Abbildung 5.32).

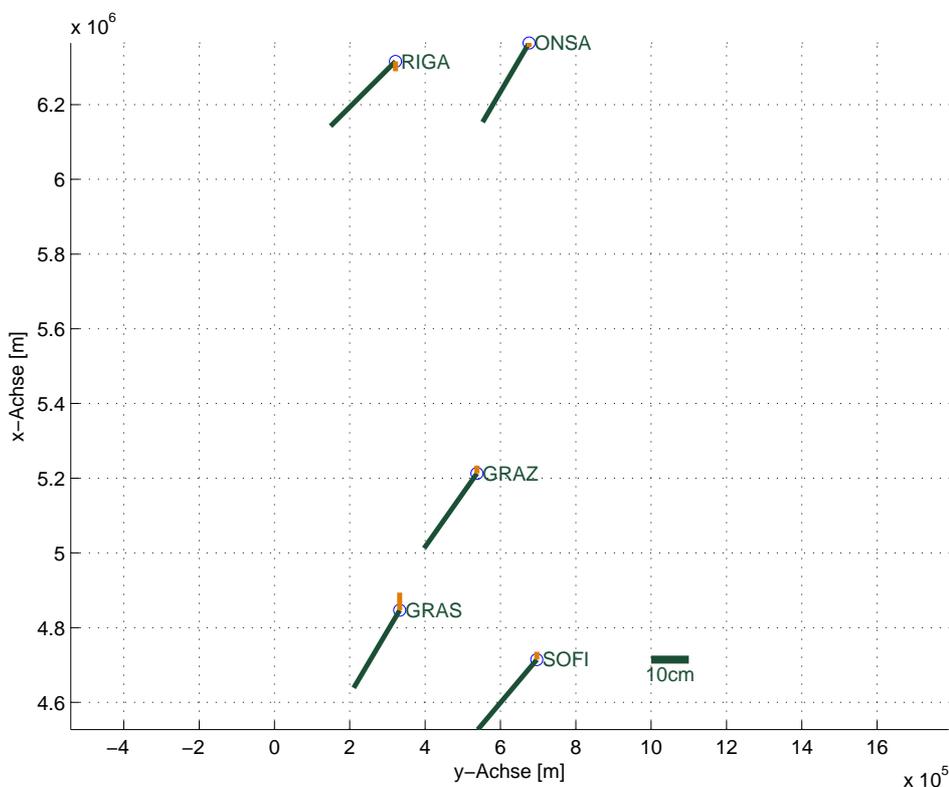


Abbildung 5.32: Berechnete Verschiebungsvektoren und Höhenänderungen

Die blauen Kreise kennzeichnen die verebneten ITRF2000-Koordinaten. Aus den Koordinatendifferenzen der verebneten ETRF89- und ITRF2000-Koordinaten wurden die Verschiebungsvektoren (in grün dargestellt) berechnet. Außerdem wurden die Höhenänderungen (in orange dargestellt) bestimmt. Wie man in den Ausgabedateien erkennt, wurden die UTM-Koordinaten in verschiedene Zonen abgebildet (Zone 32, 33, 34 und 35). In der obigen Abbildung wurden die Zonen einfach übereinander gelegt was aber keinen Einfluss auf die berechneten Verschiebungsvektoren hat.

Anhand der Verschiebungsvektoren kann man die Kontinentaldrift in nord-östliche Richtung gut erkennen. Berechnet man nun noch die mittlere Länge der 5 Lagevektoren so erhält man eine Schätzung für die mittlere Verschiebung der Eurasischen Platte (≈ 24.4 cm). Möchte man die mittlere Verschiebung pro Jahr abschätzen so muss noch durch die Differenz der Epochen zu jenen die Koordinaten gegeben sind, dividiert werden. Die ITRF2000-Koordinaten sind zur Epoche 1997.0 und die ETRF89-Koordinaten zur Epoche 1989.0 gegeben. Somit erhält man eine jährliche Plattenverschiebung von rund 3.0 cm.

5.7.2 Interpolation von Geoid-Undulationswerten

Gegeben sind die kartesischen ITRF2000-Koordinaten der Station Graz-Lusbüchel.

	Pkt. Bez.	X [m]	Y [m]	Z [m]	Höhe orth.
1	GRAZ	4194423.959	1162702.549	4647245.328	0.000

Abbildung 5.33: Koordinaten der Station Graz-Lustbühel im ITRF2000

Gesucht sind die ellipsoidische Höhe, Geoidundulation sowie die orthometrische Höhe für die Station im Datum der österreichischen Landesvermessung (MGI).

Zuerst ist ein Datumsübergang vom ITRF2000 in das MGI durchzuführen. Die kartesischen Koordinaten werden dabei in Ellipsoidkoordinaten überführt. Für das Zielsystem sind im Feld Ellipsoid-Parameter *Referenzellipsoid-Bessel* und für die Lagerung *MGI* mit dem Parametersatz *BEV* einzustellen. Somit erhält man folgende Ellipsoidkoordinaten im System MGI:

	Pkt. Bez.	Breite [°]	Breite [']	Breite ["]	Länge [°]	Länge [']	Länge ["]	Höhe ell.	Undulation	Höhe orth.
1	GRAZ	47	4	3.09456	15	29	40.12029	492.262	492.262	0.000

Abbildung 5.34: Ellipsoidkoordinaten der Station Graz-Lustbühel im MGI

Da bei der Transformation kein Geoidmodell ausgewählt wurde, kann auch keine Undulation beziehungsweise orthometrische Höhe berechnet werden. Die beiden Werte sind daher zu vernachlässigen.

Möchte man nun einen Undulationswert interpolieren so müssen die transformierten Koordinaten im Menü *Eingabe: Ellipsoidkoordinaten* geöffnet werden. In diesem Fall soll die ellipsoidische Höhe fixiert werden, deshalb ist auch der Button *fixe ellipsoidische Höhe* auszuwählen. Die Geoidbias bleibt unverändert auf dem Standardwert 0. Wählt man das Geoidmodell *Geoid_10'15'* aus, so wird mittels einer bilinearen Interpolation aus 4 Undulationswerten eine Undulation für die Position $B=47^{\circ}4'3.09456''$, $L=15^{\circ}29'40.12029''$ berechnet und automatisch in der Eingabetabelle angezeigt:

	Pkt. Bez.	Breite [°]	Breite [']	Breite ["]	Länge [°]	Länge [']	Länge ["]	Höhe ell.	Undulation	Höhe orth.
1	GRAZ	47	4	3.09456	15	29	40.12029	492.262	1.145	491.117

Abbildung 5.35: Werte für das Geoidmodell *Geoid_10'15'*

Für das Geoidmodell *Geoid_87_wgs* ergeben sich leicht unterschiedliche Werte für Undulation und orthometrische Höhe:

	Pkt. Bez.	Breite [°]	Breite [']	Breite ["]	Länge [°]	Länge [']	Länge ["]	Höhe ell.	Undulation	Höhe orth.
1	GRAZ	47	4	3.09456	15	29	40.12029	492.262	2.058	490.204

Abbildung 5.36: Werte für das Geodimodell *Geoid_87_wgs*

5.7.3 Bestimmung von Transformationsparametern

In diesem Beispiel sollen mit Hilfe von TRANS die Transformationsparameter und deren Standardabweichungen zwischen dem ITRF2000 (Epoche 1997.0) und dem ETRF2000 (Epoche 1989.0) berechnet werden. Als Identpunkte werden 11 Stationskoordinaten verwendet. In der folgenden Abbildung kann man die Verteilung der verwendeten Stationen (gelbe Punkte) über ganz Europa erkennen:



Abbildung 5.37: Verteilung der verwendeten Stationskoordinaten

Führt man die Berechnung der Transformationsparameter wie in Kapitel 5.4.2 erläutert durch, so erhält man als Ergebnis der Ausgleich folgendes Berechnungsprotokoll:

```

*****
Protokoll der Parameterberechnung
*****

Passpunktdatei des AS: ip_itrf2000.txt
Passpunktdatei des ZS: ip_etrf2000.txt

*****
Ausgeglichener Parametervektor mit Standardabw.:
*****
dX [m]:   -0.019   0.036
dY [m]:    0.133   0.041
dZ [m]:    0.002   0.036
m[ppm]:    0.0018  0.0045
wx ["]:   -0.0031  0.0012
wy ["]:   -0.0070  0.0014
wz ["]:    0.0075  0.0011

*****
Klaffungen:
*****
Koordinatentyp: kartesisch
Referenzrahmen: geozentrisch
Parametersatz:  ETRF2000
Ellipsoid:     ---

Passpunkt(ZS)  d_x[m]    d_y[m]    d_z[m]
gras           0.002    -0.002    0.007
onsa          -0.032     0.000   -0.034
graz           0.008    -0.007   -0.001
sofi          -0.016    -0.014    0.001
riga           0.014     0.007    0.026
7604           0.024    -0.004    0.021
hers           0.002    -0.006    0.001
noto           0.027     0.012   -0.018
sfer          -0.023     0.016   -0.006
madr          -0.001    -0.001    0.008
wtzr          -0.004    -0.002   -0.006

```

Abbildung 5.38: Protokoll der Parameterberechnung

Das Protokoll enthält die Transformationsparameter, deren Standardabweichungen sowie die Klaffungen (im kartesischen Koordinatensystem).

Kapitel 6

Zusammenfassung

Für die vielfältigen Aufgaben in der Geodäsie stehen heute eine Vielzahl von Referenzsystemen zur Verfügung. Für die Berechnung der GPS-Ephemeriden wird zum Beispiel das WGS 84 verwendet. Die modernen geodätischen Raumverfahren VLBI, SLR, GPS und DORIS werden für die Realisierung des ITRS eingesetzt. Auch Europa verfügt über ein eigenes Referenzsystem, das ETRS89. Weiters verwenden die einzelnen Staaten eigene nationale Bezugssysteme (zum Beispiel das MGI-Bezugssystem in Österreich).

Die Ergebnisse der modernen 3-D Raumverfahren liegen im allgemeinen zuerst als kartesische Koordinaten in einem globalen oder kontinentalen Referenzsystem vor und werden anschließend in das gewünschte System transformiert. Im Fall der österreichischen Landeskoordinaten müssen die kartesischen Koordinaten nach der Transformation in ellipsoidische Koordinaten umgerechnet und anschließend verebnet werden. Außerdem muss mit Hilfe eines geeigneten Geoidmodelles auf die Höhen des österreichischen Gebrauchssystems (quasi-orthometrische Höhen) umgerechnet werden.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit ist es gelungen, einige dieser Aufgabenstellungen mit Hilfe eines Transformations- und Abbildungsmoduls zu lösen. Bei der Erstellung dieses Programms wurde darauf geachtet, möglichst viele Einstellungen dem Benutzer zu überlassen, um so eine flexible Anpassung an bestimmte Aufgabenstellungen zu ermöglichen. Es können beispielsweise eigene Parameter für die Gauß-Krüger- oder Lambert-Abbildung definiert, neue Geoidmodelle eingebunden oder Transformationsparameter eingegeben, beziehungsweise berechnet werden.

Ausblick:

Das Programm wurde speziell für die Transformation zwischen globalen und kontinentalen Referenzsystemen und dem System der österreichischen Landesvermessung

entwickelt. Durch die Implementierung weiterer Abbildungsmethoden (zusätzlich zu der Gauß-Krüger- und Lambert-Abbildung) könnte man das Programm beliebig erweitern.

In der aktuellen Programmversion von TRANS erfolgt der Übergang zwischen bestimmten Referenzrahmen zu festgelegten Epochen ausschließlich durch eine 7-Parameter-Transformation.

Für den Epochenwechsel innerhalb eines Referenzrahmens ließe sich eine zusätzliche Funktion für die Berechnung von ITRF- beziehungsweise ETRF-Stationskoordinaten zu einer bestimmten Epoche t mit Hilfe bekannter Stationsgeschwindigkeiten, implementieren. Die direkte Transformation vom ITRF_{YY} zu einer beliebigen Beobachtungsepoche in das ETRF89 würde sich mit einer Helmert-Transformation mit zeitlich abhängigen Parametern (Altamimi Z. et al. 2007) realisieren lassen (siehe Kapitel 3.7).

Anhang - Programm-Module

Quelltext: Transformation kartesische Koord. in ellipsoidische Koord.

```
function [ ] = trafo_kart_ell
%
%Funktion: trafo_kart_ell
%Aufruf: [ ] = trafo_kart_ell
%Eingangsparameter: ---
%Ausgangsparameter: ---
%
%Zweck: 1. Einlesen der kart. Koord. aus der Tabelle uitable_eingabe
%       2. Importieren der Transformationsparameter
%       3. Transformation vom Ausgangssystem ins geoz. KS
%Falls ein Geoid verwendet wird:
%       4. Transformation der kart. K. in ell. K.
%       5. Bestimmung der Geoidundulation
%       6. Rücktransformation ins kart. KS
%
%       7. Importieren der Transformationsparameter
%       8. Transformation vom geoz. KS ins Zielsystem
%       9. Importieren der Ellipsoidparameter
%       10. Umrechnung von kart. K. in ell. K.
%       11. Ausgabe der berechneten Punkte in einer Tabelle

global H
handles = H.E_KK;

% Abfrage ob Punkte für eine Transformation zur Verfügung stehen
if isempty(handles.Daten)
    msgbox('Es stehen keine Punkte zur Verfügung!', 'Achtung', 'warn');
    return
end

index_Geoid = get(handles.popupmenu_geoid, 'Value');
index_EP_ZS = get(handles.popupmenu_ellparam_zs, 'Value');
```

```

% Einlesen der Punkte aus einer Tabelle in eine Variable 'p_k'
p_k=einlesen('KK');

[t_p, trafo_info] = import_tra_param('E_KK', '... --> geozentrisch');
p_k = fkt_kart_kart(p_k, t_p, trafo_info);

if index_Geoid > 1
    ell_param = import_ell_param(1);
    p_e_grs = fkt_kart_ell(ell_param, p_k);
    p_e_grs = import_geoid(p_e_grs, 'E_KK');
    p_k = fkt_ell_kart(ell_param, p_e_grs);
end

[t_p, trafo_info] = import_tra_param('E_KK', 'geozentrisch --> ...');
p_k = fkt_kart_kart(p_k, t_p, trafo_info);

ell_param = import_ell_param(index_EP_ZS);
p_e = fkt_kart_ell(ell_param, p_k);

ausg_ek('Initialisierung'); % Öffnen des Ausgabefensters (ell. Koord.)

ausgabe_table(p_e, 'EK'); % Fkt. für die Ausgabe der Daten in die Tabelle
header_aktuell('E_KK');
end

```

Quelltext: Transformation kartesische Koord. in Gauß-Krüger Koord.

```

function [ ] = trafo_kart_gk
%
%Funktion: trafo_kart_gk
%Aufruf: [ ] = trafo_kart_gk
%Eingangsparameter: ---
%Ausgangsparameter: ---
%
%Zweck: 1. Einlesen der kart. Koord. aus der Tabelle uitable_eingabe
%       2. Importieren der Transformationsparameter
%       3. Transformation vom Ausgangssystem ins geoz. KS
%Falls ein Geoid verwendet wird:
%       4. Transformation der kart. K. in ell. K.
%       5. Bestimmung der Geoidundulation
%       6. Rücktransformation ins kart. KS
%
%       7. Importieren der Transformationsparameter
%       8. Transformation vom geoz. KS ins Zielsystem
%       9. Importieren der Ellipsoidparameter

```

```

%      10.Umrechnung von kart. K. in ell. K.
%      11.Importieren der Gauß-Krüger-Parameter
%      12.Umrechnung von ell. K. in G-K-K.
%      13.Ausgabe der berechneten Punkte in einer Tabelle

global H
handles = H.E_KK;

% Abfrage ob Punkte für eine Transformation zur Verfügung stehen
if isempty(handles.Daten)
    msgbox('Es stehen keine Punkte zur Verfügung!', 'Achtung', 'warn');
    return
end

index_Geoid = get(handles.popupmenu_geoid, 'Value');
index_EP_ZS = get(handles.popupmenu_ellparam_zs, 'Value');
index_GKP_ZS = get(handles.popupmenu_gkparam_zs, 'Value');

% Einlesen der Punkte aus einer Tabelle in eine Variable 'p_k'
p_k = einlesen('KK');

[t_p, trafo_info] = import_tra_param('E_KK', '... --> geozentrisch');
p_k = fkt_kart_kart(p_k, t_p, trafo_info);

if index_Geoid > 1
    ell_param = import_ell_param(1);
    p_e_grs = fkt_kart_ell(ell_param, p_k);
    p_e_grs = import_geoid(p_e_grs, 'E_KK');
    p_k = fkt_ell_kart(ell_param, p_e_grs);
end

```

Quelltext: Transformation kartesische Koord. in Lambert-Koord.

```

function [ ] = trafo_kart_lamb
%
%Funktion: trafo_kart_lamb
%Aufruf: [ ] = trafo_kart_lamb
%Eingangsparameter: ---
%Ausgangsparameter: ---
%
%Zweck: 1. Einlesen der kart. Koord. aus der Tabelle uitable_eingabe
%      2. Importieren der Transformationsparameter
%      3. Transformation vom Ausgangssystem ins geoz. KS
%Falls ein Geoid verwendet wird:
%      4. Transformation der kart. K. in ell. K.
%      5. Bestimmung der Geoidundulation
%      6. Rücktransformation ins kart. KS

```

```

%      7. Importieren der Transformationsparameter
%      8. Transformation vom geoz. KS ins Zielsystem
%      9. Importieren der Ellipsoidparameter
%     10. Umrechnung von kart. K. in ell. K.
%     11. Importieren der Lambert-Parameter
%     12. Umrechnung von ell. K. in lamb. K.
%     13. Ausgabe der berechneten Punkte in einer Tabelle

global H
handles = H.E_KK;

% Abfrage ob Punkte für eine Transformation zur Verfügung stehen
if isempty(handles.Daten)
    msgbox('Es stehen keine Punkte zur Verfügung!', 'Achtung', 'warn');
    return
end

index_Geoid = get(handles.popupmenu_geoid, 'Value');
index_EP_ZS = get(handles.popupmenu_ellparam_zs, 'Value');
index_LP_ZS = get(handles.popupmenu_lambparam_zs, 'Value');

% Einlesen der Punkte aus einer Tabelle in eine Variable 'p_k'
p_k = einlesen('KK');

[t_p, trafo_info] = import_tra_param('E_KK', '... --> geozentrisch');
p_k = fkt_kart_kart(p_k, t_p, trafo_info);

if index_Geoid > 1
    ell_param = import_ell_param(1);
    p_e_grs = fkt_kart_ell(ell_param, p_k);
    p_e_grs = import_geoid(p_e_grs, 'E_KK');
    p_k = fkt_ell_kart(ell_param, p_e_grs);
end

[t_p, trafo_info] = import_tra_param('E_KK', 'geozentrisch --> ...');
p_k = fkt_kart_kart(p_k, t_p, trafo_info);

ell_param = import_ell_param(index_EP_ZS);
lamb_param = import_lamb_param(index_LP_ZS);
p_e = fkt_kart_ell(ell_param, p_k);
p_l = fkt_ell_lamb(ell_param, lamb_param, p_e);

ausg_lk('Initialisierung'); % Öffnen des Ausgabefensters (ell. Koord.)

ausgabe_table(p_l, 'LK'); % Fkt. für die Ausgabe der Daten in die Tabelle
header_aktuell('E_KK');
```

end

Quelltext: Einlesen von Geoidundulationen aus einem externen File

```
function [p_e_grs] = import_geoid(p_e_grs, fig_name)
%
%Funktion: import_geoid
%Aufruf: [p_e_grs] = import_geoid(p_e_grs, fig_name)
%Eingangsparameter: p_e_grs ... Punkt in ell. Koord. (Datenstruktur: Struktur)
%                  fig_name ... Figure-Name
%Ausgangsparameter: p_e_grs ... Punkt in ell. Koord. (Datenstruktur: Struktur)
%mit geändertem Undulationswert.
%
%Zweck: Einlesen von Geoidundulationen aus einem externen File (.bin, .txt).
>Weiters wird der Undulationswert für eine bestimmte ell. Breite und Länge
%durch bilineare Interpolation aus 4 Werten berechnet.

global H

switch fig_name
    case 'E_EK'
        handles=H.E_EK;
    case 'E_KK'
        handles=H.E_KK;
    case 'E_GK'
        handles=H.E_GK;
    case 'E_UK'
        handles=H.E_UK;
    case 'E_LK'
        handles=H.E_LK;
end

% Einlesen der Geoidbias aus Editfeld
geoidbias=str2double(get(handles.edit_geoidbias, 'String'));

% Einlesen des binären Datenfiles das im Popupmenü ausgewählt ist
index=get(handles.popupmenu_geoid,'Value');
daten_geoid = importfkt('param/geoid.dat', '%*s %s');
file=daten_geoid{1}{index};

if strcmp(file(end-2:end),'bin') || strcmp(file(end-2:end),'BIN')
    fid =fopen(file,'rb');
    daten=fread(fid,'int32');
    fclose(fid);
else
```

```

    fid = fopen(file);
    daten = textscan(fid, '%f');
    daten = daten{1};
    fclose(fid);
end
% Einlesen des Headers (Eckpunkte des Geoidgrids, Breiten- und Längendiff.
% der Undulationswerte)
u=1;
for t=1:3:16
    if daten(t) < 0
        dat(u)=daten(t) - daten(t+1)/60 - daten(t+2)/(10000*3600);
    else
        dat(u)=daten(t) + daten(t+1)/60 + daten(t+2)/(10000*3600);
    end
    u=u+1;
end

south=dat(1);
north=dat(2);
west=dat(3);
east=dat(4);
dphi=dat(5);
dlam=dat(6);

ze=round((north-south)/dphi+1);
sp=round((east-west)/dlam+1);

% Zusammenstellung der Matrix m mit den Geoidundulationen:
v=1;
for t=19:sp:length(daten)
    w=1;
    for u=t:t+sp-1
        m(v,w)=daten(u);
        w=w+1;
    end
    v=v+1;
end

u=1;
H.fehler_geoid='';
for t=1:length(p_e_grs)
    down=(north-p_e_grs(t).B)/dphi+1;
    right=(p_e_grs(t).L-west)/dlam+1;
    if down < 1 | down >= ze | right < 1 | right >= sp
        H.fehler_geoid{u}=
            sprintf('%s liegt außerhalb des Geoidgrids', p_e_grs(t).Nr);
        u=u+1;
    end
end

```

```

switch handles.hoehen_ber
    case 'fixe ellipsoidische Hoehe'
        p_e_grs(t).N=0;
        p_e_grs(t).H_orth = p_e_grs(t).H_ell;

        case 'fixe orthometrische Hoehe'
            p_e_grs(t).N=0;
            p_e_grs(t).H_ell = p_e_grs(t).H_orth;
    end
else
    i=fix(down);
    j=fix(right);
i_rest=down-i;
    j_rest=right-j;

    % Berechnung der Geoidundulation durch bilineare Interpolation aus
    % 4 Werten:
N_bilinear= m(i,j) + (m(i,j+1)-m(i,j))*j_rest + (m(i+1,j)-m(i,j))*
i_rest + (m(i,j)+m(i+1,j+1)-m(i,j+1)-m(i+1,j))*i_rest*j_rest;
N=N_bilinear/1000 + geoidbias;

switch handles.hoehen_ber
    case 'fixe ellipsoidische Hoehe'
        p_e_grs(t).H_orth = p_e_grs(t).H_ell - N;
    case 'fixe orthometrische Hoehe'
        p_e_grs(t).H_ell = N + p_e_grs(t).H_orth;
    end
end
end
end

```

Quelltext: Gauß-Krüger Abbildung (Formeln von Krüger)

```

function [p_g] = fkt_ell_gk(e_p, gk_p, p_e)
%
%Funtion: fkt_ell_gk
%Aufruf: [p_g] = fkt_ell_gk(e_p, gk_p, p_e)
%Eingangsparameter: e_p ... Ellipsoidparameter (Datenstruktur: Struktur)
%                   gk_p ... Gauß-Krüger-Parameter (Datenstruktur: Struktur)
%                   p_e ... Punkt in ell. Koord. (Datenstruktur: Struktur)
%Ausgangsparameter: p_g ... Punkt in G.-K. Koord. (Datenstruktur: Struktur)
%
%Zweck: Umrechnung der ell. Koord. in G.-K. Koord.

global H;

bog=pi/180;

```

```

% ellipsoidische Konstante
e      = e_p.e;
gamma1 = e_p.gamma1;
gamma2 = e_p.gamma2;
gamma3 = e_p.gamma3;
A      = e_p.A;

laenge_ursprung = gk_p.laenge_ursprung;
laenge_cm       = gk_p.laenge_cm;
streifenbreite  = gk_p.streifenbreite;
m_faktor_x      = gk_p.m_faktor_x;
m_faktor_y      = gk_p.m_faktor_y;
a_konst_x       = gk_p.a_konst_x;
a_konst_y       = gk_p.a_konst_y;
shk             = gk_p.shk;
zone            = gk_p.zone;

for u=1:length(p_e)
    B = p_e(u).B;
    L = p_e(u).L;

    L = L-laenge_ursprung;          % Meridianstreifen

    % Zentralmeridian wird autom. bestimmt
    if H.E_GKM.Zentralmeridian == 99999
        cm = laenge_cm;           % Central Meridian
        if L >= cm
            while abs(L-cm)>(streifenbreite/2)
                cm = cm+streifenbreite;
            end
        end
        if L < cm
            while abs(L-cm)>(streifenbreite/2)
                cm = cm-streifenbreite;
            end
        end
    end

    % gewünschter Zentralmeridian wurde vom Benutzer eingegeben
    else
        cm = H.E_GKM.Zentralmeridian;
    end

    if strcmp(zone, 'nein')
        zonenbezeichnung = cm;
    else
        if L >= laenge_cm
            zonenbezeichnung = str2double(zone)+fix(cm/streifenbreite); % Zone
        end
    end
end

```

```

end
if L < laenge_cm
    zonenbezeichnung = str2double(zone)+floor(cm/streifenbreite); % Zone
end
end
dL = (L-cm)*bog;
B = B*bog;

k = tan(pi/4+B/2)*((1-e*sin(B))/(1+e*sin(B)))^(e/2);
b = 2*atan(k)-pi/2;
xi = atan(tan(b)*sec(dL));
eta = atanh(sin(dL)*cos(b));

x = A*(xi+gamma1*sin(2*xi)*cosh(2*eta)+gamma2*sin(4*xi)*cosh(4*eta)+
gamma3*sin(6*xi)*cosh(6*eta));
y = A*(eta+gamma1*cos(2*xi)*sinh(2*eta)+gamma2*cos(4*xi)*sinh(4*eta)+
gamma3*cos(6*xi)*sinh(6*eta));

if strcmp(shk, 'ja') && x>0
    a_konst_x = 0;
end

p_g(u).Nr = p_e(u).Nr;
p_g(u).x = x * m_faktor_x + a_konst_x;
p_g(u).y = y * m_faktor_y + a_konst_y;
p_g(u).M = zonenbezeichnung;
p_g(u).H_orth = p_e(u).H_orth;
p_g(u).N = p_e(u).N;
p_g(u).H_ell = p_e(u).H_ell;
end
end

```

Quelltext: Umkehrung der Gauß-Krüger Abbildung

```

function [p_e] = fkt_gk_ell(e_p, gk_p, p_g)
%
%Funtion: fkt_gk_ell
%Aufruf: [p_e] = fkt_gk_ell(e_p, gk_p, p_g)
%Eingangsparameter: e_p ... Ellipsoidparameter (Datenstruktur: Struktur)
%                   gk_p ... Gauß-Krüger-Parameter (Datenstruktur: Struktur)
%                   p_g ... Punkt in G.-K. Koord. (Datenstruktur: Struktur)
%Ausgangsparameter: p_e ... Punkt in ell. Koord. (Datenstruktur: Struktur)
%
%Zweck: Umrechnung der G.-K. Koord. in ell. Koord.

bog=pi/180;

```

```

A = e_p.A;
beta1 = e_p.beta1;
beta2 = e_p.beta2;
beta3 = e_p.beta3;
delta1 = e_p.delta1;
delta2 = e_p.delta2;
delta3 = e_p.delta3;

laenge_ursprung = gk_p.laenge_ursprung;
laenge_cm = gk_p.laenge_cm;
streifenbreite = gk_p.streifenbreite;
m_faktor_x = gk_p.m_faktor_x;
m_faktor_y = gk_p.m_faktor_y;
a_konst_x = gk_p.a_konst_x;
a_konst_y = gk_p.a_konst_y;
shk = gk_p.shk;
zone = gk_p.zone;

for u=1:length(p_g)
    if strcmp(shk, 'ja') && p_g(u).x>0
        a_konst_x = 0;
    end

    x = (p_g(u).x - a_konst_x) / m_faktor_x;
    y = (p_g(u).y - a_konst_y) / m_faktor_y;
    zobeze = p_g(u).M;

    xi = x/A;
    eta = y/A;

    xi_s = xi-beta1*sin(2*xi)*cosh(2*eta)-beta2*sin(4*xi)*cosh(4*eta)-beta3*
sin(6*xi)*cosh(6*eta);
    eta_s = eta-beta1*cos(2*xi)*sinh(2*eta)-beta2*cos(4*xi)*sinh(4*eta)-beta3*
cos(6*xi)*sinh(6*eta);

    b = asin(sin(xi_s)/cosh(eta_s));

    B = (b+delta1*sin(2*b)+delta2*sin(4*b)+delta3*sin(6*b))/bog;
    dL = (atan(sinh(eta_s)/cos(xi_s)))/bog;
    if strcmp(zone, 'nein')
        L = dL+zobeze+laenge_ursprung;
    else
        L = dL+(zobeze-str2double(zone))*streifenbreite+laenge_cm;
    end
    p_e(u).Nr = p_g(u).Nr;
    p_e(u).B = B;
    p_e(u).L = L;

```

```

    p_e(u).H_orth = p_g(u).H_orth;
    p_e(u).N      = p_g(u).N;
    p_e(u).H_ell  = p_g(u).H_ell;
end
end

```

Quelltext: Kegelprojektion von Lambert

```

function [p_l] = fkt_ell_lamb(e_p, l_p, p_e)
%
%Funktion: fkt_ell_lamb
%Aufruf: [p_l] = fkt_ell_lamb(e_p, l_p, p_e)
%Eingangsparameter: e_p ... Ellipsoidparameter (Datenstruktur: Struktur)
%                  l_p ... Lambertparameter (Datenstruktur: Struktur)
%                  p_e ... Punkt in ell. Koord. (Datenstruktur: Struktur)
%Ausgangsparameter: p_l ... Punkt in lamb. Koord. (Datenstruktur: Struktur)
%
%Zweck: Umrechnung der ell. Koord. in lamb. Koord.

bog=pi/180;

a = e_p.a;
b = e_p.b;
e = e_p.e;
e_s2 = (a^2-b^2)/b^2; % 2.Exzentrizität

B1 = l_p.B1*bog;
B2 = l_p.B2*bog;
L0 = l_p.M*bog;

q1 = log(tan(pi/4+B1/2)*((1-e*sin(B1))/(1+e*sin(B1)))^(e/2)); % isometrische Breite
q2 = log(tan(pi/4+B2/2)*((1-e*sin(B2))/(1+e*sin(B2)))^(e/2));

c = a^2/b; % Polkrümmungsradius
V1 = sqrt(1+e_s2*cos(B1)^2);
V2 = sqrt(1+e_s2*cos(B2)^2);

n = (log(c/V1*cos(B1))-log(c/V2*cos(B2)))/(q2-q1);
A = c/(n*V1)*cos(B1)*exp(n*q1);
B = c/(n*V1)*cos(B1);

for u=1:length(p_e)
    Br = p_e(u).B*bog;
    La = p_e(u).L*bog;

    q = log(tan(pi/4+Br/2)*((1-e*sin(Br))/(1+e*sin(Br)))^(e/2));

```

```

r = A*exp(-n*q);
Theta = n*(La-L0);

x = B-r*cos(Theta);
y = r*sin(Theta);

p_l(u).Nr      = p_e(u).Nr;
p_l(u).x       = x;
p_l(u).y       = y;
p_l(u).H_orth  = p_e(u).H_orth;
p_l(u).N       = p_e(u).N;
p_l(u).H_ell   = p_e(u).H_ell;

end
end

```

Quelltext: Umkehrung der Kegelprojektion von Lambert

```

function [p_e] = fkt_lamb_ell(e_p, l_p, p_l)
%
%Funtion: fkt_lamb_ell
%Aufruf: [p_e] = fkt_lamb_ell(e_p, l_p, p_l)
%Eingangsparameter: e_p ... Ellipsoidparameter (Datenstruktur: Struktur)
%                   l_p ... Lambertparameter (Datenstruktur: Struktur)
%                   p_l ... Punkt in lamb. Koord. (Datenstruktur: Struktur)
%Ausgangsparameter: p_e ... Punkt in ell. Koord. (Datenstruktur: Struktur)
%
%Zweck: Umrechnung der lamb. Koord. in ell. Koord.

bog=pi/180;

a = e_p.a;
b = e_p.b;
e = e_p.e;
e_s2 = (a^2-b^2)/b^2; % 2.Exzentrizität

B1 = l_p.B1*bog;
B2 = l_p.B2*bog;
L0 = l_p.M*bog;

q1 = log(tan(pi/4+B1/2)*((1-e*sin(B1))/(1+e*sin(B1)))^(e/2)); % isometrische Breite
q2 = log(tan(pi/4+B2/2)*((1-e*sin(B2))/(1+e*sin(B2)))^(e/2));

c = a^2/b; % Polkrümmungsradius
V1 = sqrt(1+e_s2*cos(B1)^2);
V2 = sqrt(1+e_s2*cos(B2)^2);

```

```

n = (log(c/V1*cos(B1))-log(c/V2*cos(B2)))/(q2-q1);
A = c/(n*V1)*cos(B1)*exp(n*q1);
B = c/(n*V1)*cos(B1);

for u=1:length(p_l)
    x = p_l(u).x;
    y = p_l(u).y;

    La = 1/n*(atan(y/(B-x)))+L0;
    Theta = n*(La-L0);
    r = y/sin(Theta);
    q = 1/n*log(A/r);

    Br(1) = 2*atan(1*exp(q))-pi/2;
    k = ((1+e*sin(Br(1)))/(1-e*sin(Br(1))))^(e/2);
    Br(2) = 2*atan(k*exp(q))-pi/2;
    i=2;
    while abs(Br(i)-Br(i-1)) > 1e-11
        k = ((1+e*sin(Br(i)))/(1-e*sin(Br(i))))^(e/2);
        i=i+1;
        Br(i) = 2*atan(k*exp(q))-pi/2;
    end
    Br = Br(end);
    p_e(u).Nr = p_l(u).Nr;
    p_e(u).B = Br/bog;
    p_e(u).L = La/bog;
    p_e(u).H_orth = p_l(u).H_orth;
    p_e(u).N = p_l(u).N;
    p_e(u).H_ell = p_l(u).H_ell;
end
end

```

Quelltext: Räumliche Ähnlichkeitstransformation (Bursa-Wolf-Modell)

```

function [p_t] = fkt_kart_kart(p, t_p, trafo_info)
%
%Funktion: fkt_kart_kart
%Aufruf: [p_t] = fkt_kart_kart(p, t_p, trafo_info)
%Eingangsparameter: p ... Punkt in kart. Koord. (Datenstruktur: Struktur)
%                   t_p ... Transformationspara. (Datenstruktur: Struktur)
%                   trafo_info ... String der angibt ob von einem
%                   System ins geoz. System ('... --> geozentrisch')
%                   transformiert werden soll oder umgekehrt ('geozentrisch
%                   --> ...') bzw. ob keine Transformation durchgeführt
%                   werden soll.

```

```

%Ausgangsparameter: p_t ... transformierter Punkt (Datenstruktur: Struktur)
%
%Zweck: Transformation von kart. Koord. mit Hilfe einer 7 Parameter
%Transformation.

bog=pi/(3600*180); % Faktor zur Umrechnung von Sekunden in Radiant

wx=t_p.rotx*bog; % Umrechnung der Rot.winkel in Radiant
wy=t_p.roty*bog;
wz=t_p.rotz*bog;

% Rotationsmatrix:
R = [cos(wy)*cos(wz), sin(wx)*sin(wy)*cos(wz)+cos(wx)*sin(wz), ...
-cos(wx)*sin(wy)*cos(wz)+sin(wx)*sin(wz)
-cos(wy)*sin(wz), -sin(wx)*sin(wy)*sin(wz)+cos(wx)*cos(wz), ...
cos(wx)*sin(wy)*sin(wz)+sin(wx)*cos(wz)
sin(wy), -sin(wx)*cos(wy), ...
cos(wx)*cos(wy)];

a= [t_p.dx
t_p.dy
t_p.dz]; % Verschiebungsvektor

m= 1+t_p.m*10^(-6); % Maßstab

for t=1:length(p)
x= [p(t).x
p(t).y
p(t).z];

switch trafo_info
case '... --> geozentrisch' % Abfrage der Transformationsrichtung
X=1/m*(R*(x-a));

case 'geozentrisch --> ...'
X=a+m*R*x;

case 'keine Trafo'
X=x;
end

p_t(t).Nr=p(t).Nr;
p_t(t).x=X(1);
p_t(t).y=X(2);
p_t(t).z=X(3);
p_t(t).H_orth=p(t).H_orth;
end

```

end

Quelltext: Berechnung der Transformationsparameter (vermittelnde Ausgleichung)

```
function [X_d] = ber_trafo_param(p_a, p_z)
%
%Funktion: ber_trafo_param
%Aufruf: [X_d] = ber_trafo_param(p_a, p_z)
%Eingangsparameter: p_a ... Pkt.(kart.) im AS
%                  p_z ... Pkt.(kart.) im ZS
%Ausgangsparameter: X_d ... ausgeglichener Parametervektor
%
%Zweck: Berechnung von Transformationsparametern durch eine vermittelnde
%Ausgleichung. Außerdem werden die Klaffungen zw. den ausgeglichenen
%Beobachtungen und den gegebenen Koordinaten im Zielsystem berechnet.

global H

bog=pi/180;

X_o =[0;0;0;1;0;0;0];      % genäherter Parametervektor

% Designmatrix A:
j=-2;
for i=1:length(p_a)
    j=j+3;
    A(j:j+2,:)= [1 0 0 p_a(i).x 0          -p_a(i).z  p_a(i).y
                 0 1 0 p_a(i).y p_a(i).z  0          -p_a(i).x
                 0 0 1 p_a(i).z -p_a(i).y p_a(i).x  0          ];
end

% gekürzter Beobachtungsvektor l:
j=-2;
for i=1:length(p_a)
    j=j+3;
    l(j:j+2,:)= [p_z(i).x - (X_o(1)+p_a(i).x*X_o(4)-p_a(i).z*X_o(6)+p_a(i).y*X_o(7))
                p_z(i).y - (X_o(2)+p_a(i).y*X_o(4)+p_a(i).z*X_o(5)-p_a(i).x*X_o(7))
                p_z(i).z - (X_o(3)+p_a(i).z*X_o(4)-p_a(i).y*X_o(5)+p_a(i).x*X_o(6))];
end

% gekürzter Parametervektor
x = inv(A'*A)*A'*l;

% ausgeglichener Parametervektor
X_d = X_o+x;
```

```
% ausgeglichene Beobachtungen L_d
for i=1:length(p_a)
    p_L_d(i).Nr = p_z(i).Nr;
    p_L_d(i).x = X_d(1)+p_a(i).x*X_d(4)-p_a(i).z*X_d(6)+p_a(i).y*X_d(7);
    p_L_d(i).y = X_d(2)+p_a(i).y*X_d(4)+p_a(i).z*X_d(5)-p_a(i).x*X_d(7);
    p_L_d(i).z = X_d(3)+p_a(i).z*X_d(4)-p_a(i).y*X_d(5)+p_a(i).x*X_d(6);
    p_L_d(i).H_orth = 0;
end

v=A*x-l;      % Verbesserungen treten als Klaffungen auf --> RICHTIG

% Normalgleichungsmatrix
N=A'*A;

% Kofaktormatrix der Parameter
Q_xx = inv(N);

% Schätzwert für den Varianzfaktor
s_o2 = (v'*v)/(3*length(p_z)-7);      % Varianz der Gewichtseinheit a posteriori

% Kovarianzmatrix
Sigma_xx = s_o2*Q_xx;

% Berechnung der Standardabw. für den Parametervektor
for i=1:7
    sigma(i) = sqrt(Sigma_xx(i,i));
end

% Mittlere Klaffung für Punkt
s_p=sqrt(2*s_o2);

% Berechnung der Klaffungen
[s_kl_beschr, s_kl]=berechnung_klaffung(p_a, p_z, p_L_d);
end
```

Literaturverzeichnis

[Ahner H., Döllner H. 1997] Ahner H., Döllner H.: *AREF-1 - Das GPS-Grundnetz von Österreich als Basis der modernen telematischen Geodäsie*. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation Heft 2 (1997).

[Altamimi Z. et al. 2007] Boucher C., Altamimi Z.: *Memo : Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign*.
<http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V7.pdf>, Version 6, 2007

[BEV] BEV: *Homepage des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen*.
<http://www.bev.gv.at/>

[Bretterbauer K., Schuh H. 2004] Bretterbauer K., Schuh H.: *Skriptum zur Vorlesung Höhere Geodäsie*. Institut für Geodäsie und Geophysik, TU Wien, 2004.

[EUREF] EUREF: *Homepage der IAG Reference Frame Sub-Commission für Europa*. <http://www.euref.eu/>

[Hoffmann-Wellenhof B. et al. 2008] Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E.: *GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Verlag, 2008.

[Höggerl N. et al. 2002] Höggerl N., Weber R., Pesec P., Stangl G., Fragner E.: *Realisierung moderner 3-D Referenzsysteme für Wissenschaft und Praxis*. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation Heft 3+4 (2002).

[Höggerl N.] Höggerl N.: *Realisierung des Europäischen Bezugssystems ETRS89 durch APOS - Austrian Positioning Service*.
<http://www.mplusm.at/ifg/download/Hoeggerl-05.pdf>

[Höggerl N. et al. 2010] Höggerl N., Titz H., Imrek E., Stangl G.: *Realisierung und Monitoring von ETRS89 in Österreich*. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation Heft 2 (2010).

[ICRS 2010] ICRS Product Center: *Homepage des ICRS Product Center*.
<http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/>

[IERS 2010] IERS Central Bureau: *Homepage des International Earth Rotation and Reference System Service*. <http://www.iers.org/>, Stand: Oktober 2010.

[ITRF 2010] ITRF: *Homepage des International Terrestrial Reference Frame*.
<http://itrf.ensg.ign.fr/>, Stand: September 2010.

[Kraus K. 2004] Kraus K.: *Photogrammetrie*. Band 1, de Gruyter Lehrbuch, Berlin-New York, 2004

[McCarthy D., Petit G. 2003] McCarthy D., Petit G.: *IERS Conventions (2003)*. IERS Technical Note 32. <http://www.iers.org/> -> Publications.

[Navratil G. 2007] Navratil G.: *Skriptum zur Vorlesung Ausgleichungsrechnung II*. Institut für Geoinformation, TU Wien, 2007.

[Torge W. 2003] Torge W.: *Geodäsie*. Walter de Gruyter, Berlin-New York, 2003

[Weber R. 2008] Weber R.: *Skriptum zur Vorlesung Satellitengeodäsie*. Institut für Geodäsie und Geophysik, TU Wien, 2008

[Weber R. 2010] Weber R.: *Skriptum zur Vorlesung Geo-Koordinatensysteme*. Institut für Geodäsie und Geophysik, TU Wien

Abbildungsverzeichnis

2.1	Kartesisches Koordinatensystem	10
2.2	Ellipsoidkoordinatensystem	11
2.3	Definierende Radioquellen des ICRF2	12
2.4	Stationen des ITRF2005	14
2.5	Geschwindigkeitsvektoren der ITRF2008-Stationen	15
2.6	Stationsverteilung im EUREF Permanent Tracking Network	21
2.7	Kurzweilige Inhomogenitäten des Festpunktfeldes bezogen auf einen mittleren Transformationsparametersatz	23
2.8	Meridianstreifenüberdeckung in Österreich	24
2.9	APOS-Permanentstationsnetz	27
2.10	Hierarchieschema für die Realisierung von ETRS89 in Österreich	28
3.1	Ebene Drehung	31
3.2	7-Parameter-Transformation	34
3.3	Transformationsparameter und deren Änderungsraten	41
4.1	geodätisches Parameterliniennetz	46
4.2	isothermes Parameterliniennetz	46
4.3	Transversale Mercator Projektion	47
4.4	UTM-System	50
4.5	Lambertsche Kegelprojektion	51
4.6	ausgerollter Kegel	52
5.1	Das Hauptmenü dient als Ausgangspunkt für alle weiteren Funktionen.	56
5.2	Formatierung einer Punktdatei	57
5.3	Menü zur Eingabe kartesischer Koordinaten.	59
5.4	Menü zur Ausgabe von Ellipsoidkoordinaten.	60
5.5	Menü zur Eingabe von Ellipsoidkoordinaten.	61
5.6	Menü zur Ausgabe von Lambertkoordinaten.	62
5.7	Menü zur Eingabe von Gauß-Krüger-Koordinaten.	63
5.8	Menü zur Auswahl der Meridianstreifenbestimmung.	64

5.9	Menü zur Ausgabe von Gauß-Krüger-Koordinaten.	64
5.10	Menü zur Eingabe von Lambert-Koordinaten.	65
5.11	Menü zur Ausgabe von kartesischen Koordinaten.	66
5.12	Beispiel eines Berechnungsprotokolles	67
5.13	Formatierung einer Punktdatei	69
5.14	Menü zur Eingabe von Transformationsparametern.	70
5.15	Menü zum Bearbeiten von Transformationsparametern.	71
5.16	Datei der Transformationsparameter	72
5.17	Menü zur Berechnung der Transformationsparameter.	73
5.18	Fenster zur graphischen Anzeige der Klaffungen.	75
5.19	Menü zum Bearbeiten der Referenzrahmen.	76
5.20	Menü zur Eingabe der Ellipsoidparameter.	76
5.21	Datei der Ellipsoidparameter	77
5.22	Menü zur Eingabe der Gauß-Krüger-Parameter.	77
5.23	Datei der Gauß-Krüger Parameter	79
5.24	Menü zur Eingabe der Lambert-Parameter.	79
5.25	Datei der Lambert-Parameter	79
5.26	Datei: <i>geoid.dat</i>	80
5.27	Datei der Geoidundulationen	81
5.28	Geoidmodell	82
5.29	Fundamentalstationen des ITRF2000	83
5.30	Ausgabedatei der verebneten ITRF2000-Koordinaten	83
5.31	Ausgabedatei der verebneten ETRF89-Koordinaten	84
5.32	Berechnete Verschiebungsvektoren und Höhenänderungen	85
5.33	Koordinaten der Station Graz-Lustbühel im ITRF2000	86
5.34	Ellipsoidkoordinaten der Station Graz-Lustbühel im MGI	86
5.35	Werte für das Geoidmodell <i>Geoid_10'15'</i>	86
5.36	Werte für das Geoidmodell <i>Geoid_87_wgs</i>	87
5.37	Verteilung der verwendeten Stationskoordinaten	87
5.38	Protokoll der Parameterberechnung	88

Akronymverzeichnis

AGREF	Austrian Geodynamic Reference Frame
APOS	Austrian Positioning Service
APOS-DGPS	APOS-Differential GPS
APOS-RTK	APOS-Real Time Kinematic
AREF	Austrian Reference Frame
BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (Frankfurt am Main)
CIO	Conventional International Origin
CIS	Conventional Inertial System
CRS	Celestial Reference System
CTP	Conventional Terrestrial Pole
DMA	Defense Mapping Agency
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
EGM96	positioning Integrated by Satellite
ETRF	European Terrestrial Reference Frame
ETRS	European Terrestrial Reference System
EUREF	European Reference Frame
EPN	EUREF Permanent Network
FK5	Fundamentalkatalog 5

GNSS Global Navigation Satellite System

GPRS General Packet Radio Service

GPS Global Positioning Service

GRS80 Geodetic Reference System 1980

GSM Global System for Mobile Communications

HIPPARCOS High Precision Parallax Collecting Satellite

IAG International Association of Geodesy

IAU International Astronomical Union

ICRF International Celestial Reference Frame

ICRS International Celestial Reference System

IERS International Earth Rotation and Reference Service

ITRF International Terrestrial Reference Frame

ITRS International Terrestrial Reference System

LOD Length of Day

MGI Militär Geographisches Institut

NATO North Atlantic Treaty Organization

NIMA National Imaging and Mapping Agency

NNR-NUVEL No Netto Rotation-Global Plate Motion Model

NTRIP Networked Transport of RTCM via Internet Protocol

OLG Observatorium Lustbühel Graz

ÖAW Österreichische Akademie der Wissenschaften

ÖK 50000 Österreichische Karte im Maßstab 1:50000

RINEX Receiver Independent Exchange Format

RTCM Radio Technical Commission for Maritime Services

SI System International d'Unites
SLR Satellite Laser Ranging
TWG Technical Working Group
UMTS Universal Mobile Telecommunications System
UPS Universal Polar Stereographic
UT Universal Time
UTM Universal Transverse Mercator
VLBI Very Long Baseline Interferometry
WGS84 World Geodetic System 1984

Lebenslauf

Name: Michael Lechner

geboren am: 17.02.1985 in Amstetten als Sohn von Katharina und Josef Lechner

1991 - 1995: Besuch der Volksschule in Viehdorf

1995 - 2003: Besuch des Bundesgymnasiums in Amstetten

Juni 2003: Reifeprüfung

2003 - 2004: 8 Monate Präsenzdienst beim Österreichischen Bundesheer in
Mautern

Oktober 2004: Inskription *Vermessung und Geoinformation* an der TU Wien

31.01.2007: 1. Diplomprüfung