

Potential von GPS Navigationsempfängern¹

Volker Schwieger
Universität Stuttgart
Institut für Anwendungen
der Geodäsie im Bauwesen
Geschwister-Scholl-Str. 24D
D-70174 Stuttgart
volker.schwieger@iagb.uni-stuttgart.de

Lambert Wanninger
TU Dresden
Geodätisches Institut
D-01062 Dresden
lambert.wanninger@tu-dresden.de

1 Motivation

Das Satellitensystem GPS (Global Positioning System) gehört inzwischen zum täglichen Handwerkszeug des Geodäten in der Praxis. Viele Auswerteprozeduren sind standardisiert und laufen weitestgehend automatisiert ab. In der Regel nutzt der Geodät für seine Anwendungen GPS Empfangssysteme, die Phasendaten auf zwei Frequenzen aufzeichnen und häufig in Echtzeit auswerten. Das Genauigkeitspotential liegt dabei im Bereich von ein bis fünf cm. Das gilt auch für die Positionsbestimmung innerhalb von Referenzstationsnetzen. In den letzten Jahren finden zunehmend Untersuchungen statt, deren Gegenstand die Positionsbestimmung mit Ein-Frequenz Empfängern unter Nutzung von Phasendaten im Genauigkeitsbereich einiger cm ist.

Auf der anderen Seite bleibt auch dem Geodäten nicht verschlossen, dass das GPS inzwischen breiten Einzug in das tägliche Leben gehalten hat: GPS Empfänger in der Fahrzeugnavigation, GPS Empfänger zur Ortsbestimmung beim Segeln, GPS Empfänger in Kombination mit Mobiltelefonen. Die Genauigkeit der bestimmten Positionen liegt hier aufgrund der ausgewerteten Codedaten nur im Bereich von etwa fünf bis zehn Metern; auch die relative Positionsbestimmung bringt hier keine entscheidende Genauigkeitssteigerung. Diese deutlich preisgünstigeren GPS Empfänger werden allgemein entsprechend ihrer Anwendung als Navigationsempfänger bezeichnet.

Eine ideale Kombination wäre folglich der Einsatz von preisgünstigen Navigationsempfängern für geodätische Einsatzfelder. In diesem Beitrag soll aufgezeigt

^{1 1} In: „GPS und Galileo – Methoden, Lösungen und neueste Entwicklungen“, 66. DVW-Seminar, Darmstadt, DVW-Schriftenreihe Band 49/2006, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 221-239, 2006

werden, dass dieser Empfängertyp bereits Genauigkeiten erreichen kann, die einen baldigen Einsatz möglich erscheinen lassen.

2 GPS Navigationsempfänger

Für den Freizeitbedarf bieten mehrere Hersteller (zum Beispiel Magellan, Garmin, Trimble) GPS Empfänger unterschiedlicher Komfortklassen an. Allen Empfängern ist gemein, dass sie in Echtzeit eine sogenannte Navigationslösung auf Basis der L1-Codedaten generieren und dem Nutzer anzeigen. Sie werden häufig als Navigationsempfänger bezeichnet. Das Genauigkeitsniveau bewegt sich dabei zwischen fünf und zehn Metern. In der Regel besteht keine Möglichkeit die Rohdaten abzuspeichern. Dagegen kann die jeweils aktuelle Navigationslösung und diverse weitere Informationen wie z.B. die Satellitenanzahl oder das Genauigkeitsmaß PDOP unter Nutzung sogenannter NMEA-Datensätze über die serielle Schnittstelle ausgelesen werden. Die auf diese Weise erhaltene Position erreicht das zuvor genannte Genauigkeitsniveau.

Hauptanwendungsgebiete sind zum einen die Freizeitbranche (zum Beispiel Ortsbestimmung beim Segeln) und zum anderen die Fahrzeugnavigationssysteme. Zur Positionsbestimmung und Navigation werden die GPS Empfänger zum Teil mit Barometern zur Höhenbestimmung oder elektronischen Kompassen zur Bestimmung des Azimuts gestützt. Für die Navigationsfunktion ist außerdem die Kartendarstellung erforderlich, die einige dieser GPS Empfänger als Zusatzfunktion vorhalten. Tabelle 1 fasst die unterschiedlichen Charakteristika von präzisen geodätischen GPS Empfängern und Navigationsempfängern zusammen.

Tabelle 1: Charakteristika von Navigationsempfängern und präzisen geodätischen Empfängern im Vergleich

GPS Empfängerklasse	Geodätischer Empfänger	Navigationsempfänger
Genutztes Signal	Code und Phase, meist 2 Frequenzen	Code oder phasengeglätteter Code, 1 Frequenz
Genauigkeit	0,0001 bis 0,1 m	1 bis 10 m
Beschaffungskosten	10 000 bis 30 000 €	100 – 500 €
Anwendungen	Vermessung, Geodynamik, präzise Kinematik	Fahrzeugnavigation, Location Based Services, Massenmarkt,

GPS Navigationsempfänger unterscheiden sich von präzisen geodätischen Empfängern hinsichtlich der Auswertung insbesondere in dreierlei Hinsicht:

- Positionsbestimmung mittels Codedaten und *nicht* mittels Phasendaten,
- generell Ein-Frequenz Empfänger und *nicht* Zwei-Frequenz Empfänger,
- *keine* Möglichkeit zur Speicherung der Rohdaten.

Das Kernproblem stellt die Verfügbarkeit der Trägerphasen als Messgröße dar. Nun nutzt eine Vielzahl von Navigationsempfängern die Trägerphase nicht zur Positionsbestimmung sondern zu Glättung der Codes zwecks einer genaueren und robusteren Positionsbestimmung auf Basis der geglätteten Codebeobachtungen. In der Regel wird folglich die Trägerphase im Empfänger gemessen und in die Auswertung eingebracht. Sie ist aber für den Nutzer nicht verfügbar.

Ein nachgeordnetes Problem stellt die Antennenkalibrierung für Navigationsempfänger dar. Erst für den Fall, dass Phasendaten verfügbar sind, erreicht die Genauigkeit der Positionsbestimmung ein Niveau, das die Berücksichtigung dieser Korrektur erforderlich macht.

Die Firma Garmin nutzt für ihre Navigationsempfänger wie den GPS 12XL oder den eTrex Vista nicht dokumentierte Phasenglättungsalgorithmen. Im Gegensatz zu den anderen Herstellern bietet Garmin die Möglichkeit auf die Rohdaten via serielle Schnittstelle zuzugreifen. Insbesondere existiert ein ursprünglich für Testzwecke geschaffenes internes Protokoll, das sowohl die Code- als auch die Phasendaten enthält. Das Format dieses internen Protokolls ist zwar veröffentlicht, aber Garmin garantiert die Unterstützung *nicht* (GARMIN 2004). Der Nutzer erhält über die Schnittstelle die Möglichkeit Code- und Phasendaten in Echtzeit auf einem Rechner aufzuzeichnen und im Post-Processing auszuwerten.

Auf diese Weise können zwei zuvor genannte Probleme von Navigationsempfängern überwunden werden: Verfügbarkeit der Phasendaten und Speicherung aller Rohdaten. Es verbleibt die Ein-Frequenz Messung als Einschränkung. Diese bedingt zum einen den verstärkten Einfluss der Ionosphäre und zum anderen die erschwerte Festsetzung der Mehrdeutigkeiten bei der Phasenauswertung. Diese Mängel lassen sich nicht heilen und können nur durch die Beschränkung auf kurze Basislinien kleingehalten werden.

3 Phasenauswertung für Garmin Empfänger

Um die Phasenbeobachtungen für eine nachfolgende Positionsbestimmung nutzen zu können, müssen diese gemeinsam mit den Codedaten aufgezeichnet werden. Dieses gelingt mit verschiedenen am Markt verfügbaren Programmen. Beispielfhaft seien hier die Programme ASYNC (GALAN 2000) und GRINGO (GRINGO 2000) genannt. Beide Programme laufen auf einem handelsüblichen PC oder Notebook unter Windows, nutzen die serielle Schnittstelle zum Dekodieren des internen Garmin Formats und zeichnen Code- und Phasendaten im RINEX-Format (Receiver Independent Exchange Format) auf. Im Rahmen der hier beschriebenen Arbeiten wurde aufgrund der höheren Stabilität ausschließlich GRINGO (GPS Rinex Generator) des Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy der University of Nottingham eingesetzt. HILL et al. (1999) und (2001) dokumentieren erste Ergebnisse mit der Software. Bei ihren Untersuchungen stellen sie unter anderem fest, dass die Phasendaten Phasensprünge mit halber Wellenlänge, sogenannte halbe Phasensprünge aufweisen. Diese Tatsache kann bei den hier vorliegenden Untersuchungen bestätigt werden. Sie erweist als ein entscheidendes Hindernis um eine genaue Positionsbestimmung durchzuführen, da kein gängiges GPS Auswertprogramm über die Möglichkeit verfügt, halbe Phasensprünge zu detektieren und zu reparieren. Zu diesem Punkt folgen in Kapitel 3.2 einige Ausführungen.

Halbe Phasensprünge sind aus den Anfangsjahren des GPS bekannt. Damals wurde die Trägerphase auf der zweiten Frequenz L2 größtenteils mittels Quadrierung des Signals rekonstruiert. Geodätische Empfänger der heutigen Generation greifen für die Rekonstruktion der zweiten Frequenz auf anderen Techniken wie zum Beispiel dem Z-Tracking zurück. Die Quadrierung der ersten Frequenz kann als Grund für die halben Phasensprünge ausgeschlossen werden, da die Anwendung dieser Technik aufgrund der Verfügbarkeit des C/A-Codes auf der ersten Frequenz L1 nicht erforderlich ist. Es ist vielmehr davon auszugehen, dass es sich um Mehrdeutigkeitsprobleme aufgrund der Nutzung des Arctan-Korrelators handelt, die bei einem geodätischen Empfänger mit Hilfe nachgeschalteter Signalverarbeitung aufgelöst werden können. Diese Aussage kann allerdings nicht verifiziert werden, da die internen Abläufe der Garmin Empfänger nicht veröffentlicht sind.

3.1 Messinstrumentarium

Bei den für die Messungen eingesetzten GPS Empfängern handelt es sich um zwei Garmin eTrex Vista, die am Institut für Anwendungen der Geodäsie der Universität Stuttgart (IAGB) zur Verfügung stehen. Es können daher sowohl reine Garmin Basislinien als auch gemischte Basislinien, die relative Koordinaten zwischen einem Garmin Empfänger und einem präzisen geodätischen Empfänger ermitteln, bestimmt werden. Bei dem Garmin eTrex Vista (Abbildung 1) wird der GPS Empfänger um einen Kompass, ein Barometer und eine Kartendarstellung ergänzt. Es handelt sich folglich um einen Navigationsempfänger mit allen Komfortfunktionen. Die GPS Positionsbestimmung erfolgt aber für alle Empfänger der eTrex Serie im selben Genauigkeitsniveau.

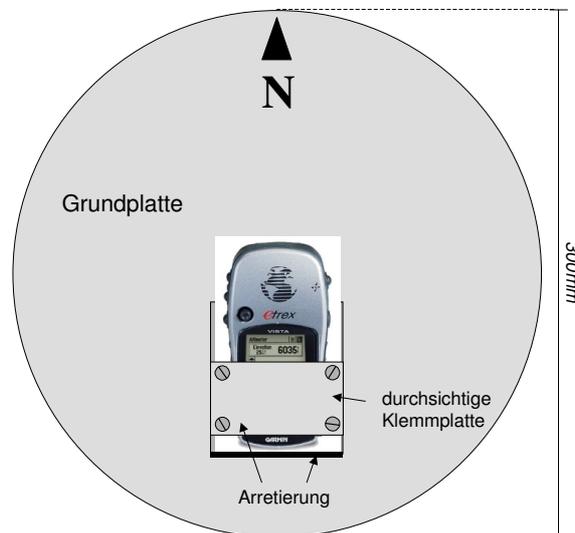


Abbildung 1: Grundplatte und Garmin eTrex Vista in der Draufsicht

Navigationsempfänger verfügen aufgrund des standardmäßigen Genauigkeitsniveaus und Anwendungsbereichs nicht über die Möglichkeit zur Horizontierung und Zentrierung. Aus diesem Grund entwickelte die Werkstatt des IAGB einen Adapter, der die Fixierung des Garmin Empfängers auf einem Leica Dreifuß erlaubt. Dabei wird der Empfänger mit Hilfe einer durchsichtigen Klemmplatte eingespannt. Dieses gelingt auf 1 mm genau. Die Ausrichtung nach Norden ist gleichfalls sichergestellt (Abbildung 1). Erste Messungen mit den Garmin Empfänger im Jahre 2003 zeigten außerdem eine deutliche Anfälligkeit des Empfängers gegenüber Mehrwegeeffekten (SCHWIEGER 2003). In der Folge wurde zunächst eine aus Wellpappe und Aluminiumpapier bestehende Abschirmung gegen Bodenreflexionen konstruiert. Diese Abschirmung wurde 2004 durch eine Metallgrundplatte ersetzt (SCHWIEGER und GLÄSER 2005). Die Garmin

Adapter bestehen folglich zurzeit aus der Zentrierungsvorrichtung und der stählernen Abschirmung.

Bei der Durchführung der Antennenkalibrierung an der TU Dresden wurde festgestellt, dass die Abschirmung starke Veränderungen der Antenneneigenschaften verursachen. Die notwendigen Antennenkorrekturen werden von ihrem Betrag her sehr viel größer. Weiterhin scheinen langperiodische Mehrwegeeinflüsse die Phasendaten zu verschlechtern. Hierzu erfolgen im Kapitel 4 weitere Ausführungen.

Zur Aufzeichnung der Rohdaten werden die Garmin eTrex Vista jeweils über ein serielles Kabel mit einem Laptop verbunden. Um die Messausrüstung wetterunabhängig betreiben zu können, werden robuste Notebooks zu Datenaufzeichnung verwendet. Abbildung 2 zeigt die gesamte Messausrüstung.



Abbildung 2: Garmin eTrex Vista mit Adapter, Abschirmung und robustem Notebook

Auf den robusten Notebooks läuft die bereits angesprochen Software GRINGO, die den Datenstrom der GPS Empfänger dekodiert und in eine Datei im Format RINEX 2.1 erstellt. Es wird die GRINGO Version 2.0.0 eingesetzt, die unter Windows 95, 98 und 2000 lauffähig ist. Um Beobachtungszeiten von mehr als zwei Stunden zu erreichen, wird die Stromversorgung von Notebook und GPS Empfänger mittels Autobatterien sichergestellt. Beobachtungszeiten von 24 Stunden konnten auf diese Weise bereits umgesetzt werden.

3.2 Auswerteprozedur

Für die weitere Auswertung liegen nun RINEX Beobachtungsdateien, die Code- und Phasendaten enthalten, vor. Diese können von jeder kommerziellen oder wissenschaftlichen Software eingelesen und weiterverarbeitet werden. Die GRINGO Software erlaubt nur die Aufzeichnung der Beobachtungsdateien; die Satellitenephemeriden, die im Prinzip auch im Garmin zur Verfügung stehen und ausgegeben werden, können nicht aufgezeichnet werden. Für die nachfolgende Auswertung sind diese Informationen aber unverzichtbar. Dieses stellt für den Fall gemischter Basislinien mit geodätischen Empfängern kein Problem dar, weil in diesem Fall die Broadcast-Ephemeriden durch den geodätischen Empfänger bereitgestellt werden. Um eine Auswertung reiner Garmin Basislinien durchführen zu können, müssen die entsprechenden Dateien zum Beispiel aus dem Internet heruntergeladen werden. Broadcast-Ephemeriden stehen beispielsweise unter <http://igs.ifag.de> zur Verfügung.

Am IAGB steht zur Auswertung von GPS Messungen das Programm SKI-Pro (inzwischen integriert in Leica Geo Office) der Firma Leica zur Verfügung. Diese Software nutzt doppelte Differenzen zur Bestimmung der relativen Basislinienkoordinaten. Für Leica-Empfänger kann die Auswertung weitestgehend automatisiert erfolgen. Zur Auswertung der Garmin Daten wird hier die Version 2.5 herangezogen. SKI-Pro kann aber keine Garmin-spezifischen halben Phasensprünge berücksichtigen. Aus diesem Grunde dürfen bei der Auswertung die Mehrdeutigkeiten nicht festgesetzt werden, da eventuell fehlerhafte Mehrdeutigkeiten zu fehlerhaften Positionen führen. Es werden daher Float-Lösungen gerechnet. Die komplette Auswerteprozedur wird hier nicht dargestellt. Es sei aber darauf hingewiesen, dass eine Elimination von Satelliten auf Basis der Analyse der Residuen eine Verbesserung der Positionslösung sicherstellt (SCHWIEGER und GLÄSER 2005).

Da die SKI-Pro Auswertungen den Mangel der Float-Lösungen aufweisen und insbesondere für kurze Basislinien nur festgesetzte Mehrdeutigkeiten (fixed Lö-

sungen) hohe Genauigkeiten sicherstellen, wird in diesem Beitrag nachfolgend die Auswertung mit einer Software, die diesen Mangel heilt, behandelt.

Das an der TU Dresden vorhandene Basislinienprozessierungsmodul Wa1, welches ursprünglich nur zur Prozessierung von normalen Ein- oder Zweifrequenzbeobachtungen gedacht war, wurde so modifiziert, dass es nun auch halbe Phasensprünge und Mehrdeutigkeiten, wie sie bei Garmin-Empfängern auftreten, korrekt festsetzen kann. Die notwendigen Anpassungen betrafen insbesondere die implementierten mehrstufigen Mehrdeutigkeitslösungsalgorithmen. Die Halbierung der Wellenlänge führt aber dazu, dass längere Beobachtungszeiten als bei Einfrequenzbeobachtungen mit voller Wellenlänge (und sehr viel längere als bei Zweifrequenzbeobachtungen) notwendig sind, um eine zuverlässige Mehrdeutigkeitsfestsetzung zu ermöglichen.

4 Antennenkalibrierung

Nach Lösung der Mehrdeutigkeitsfestsetzungsproblematik durch die Anpassung der Wa1-Software, war es nun auch möglich die internen Garmin-Antennen vollständig zu kalibrieren. Antennenkalibrierungen werden an der TU Dresden seit einigen Jahren mit Hilfe einer automatischen Dreheinrichtung vorgenommen. Sie ermöglicht Messungen mit der zu kalibrierenden Antenne in mehreren unterschiedlichen azimutalen Ausrichtungen pro Minute. Die Referenzantenne, für die absolute Antennenkorrekturen vorliegen, wird dabei nicht bewegt. Als Ergebnis erhält man absolute Antennenkorrekturen in der Form mittlerer Phasenzentrumsoffsets (PZO) und azimut-elevationsabhängiger Phasenzentrumsvariationen (PZV).

Bei der Kalibrierung der Garmin-Empfänger des IAGB wurde die Dreheinrichtung der ersten Generation (DRB 1) eingesetzt (FREVERT u.a. 2003, Abbildung 4). Inzwischen existiert eine zweite Generation (DRB 2), die den Kalibriervorgang weiter vereinfacht (FREVERT u.a. 2005). Die Kalibrierung erfolgte mit dem Basislinienmodul Wa1 und dem Kalibrierungsauswertemodul Wa1ANT.

Die Kalibrierungen wurden mit und ohne Abschirmung (nur einfache Halterung) durchgeführt. Zur vereinfachten Darstellung wurden die Korrekturen der beiden individuellen Geräte gemittelt und nur diese Mittelwerte wurden für Abbildung 5 verwendet. Dagegen wurden die in Kapitel 5 diskutierten Auswertungen mit individuellen Korrekturen durchgeführt.

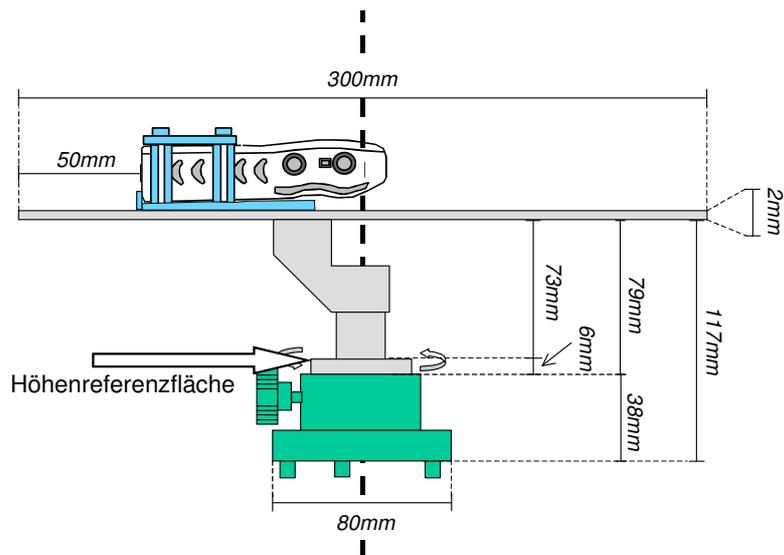


Abbildung 3: Garmin Adapter und Höhenreferenzfläche



Abbildung 4: Automatische Dreheinrichtung des Geodätischen Instituts der TU Dresden zur Kalibrierung von GNSS-Antennen (DRB 1, FREVERT u.a. 2003)

Die Verwendung der abschirmenden Grundplatte verändert das Antennenverhalten der Garmin eTrex Vista deutlich (Abbildung 5). Während die Geräte ohne Abschirmung das typische Verhalten kleiner Antennen, nämlich nur kleine Phasenzentrumsvariationen (Maximalwert 10 mm) und geringe Azimutabhängigkeiten aufweisen, führt die Abschirmung dazu, dass maximale Phasenzentrumsvariationen von 25 mm auftreten und auch starke azimut- und elevationsabhängige Phasenzentrumsvariationen die Phasemessungen beeinflussen. Die Aussagekraft der Phasenzentrumsoffsets in Bezug auf die Empfänger selbst ist in beiden Fällen gering, weil sich hier insbesondere Besonderheiten der jeweiligen Antennenhalterung widerspiegeln.

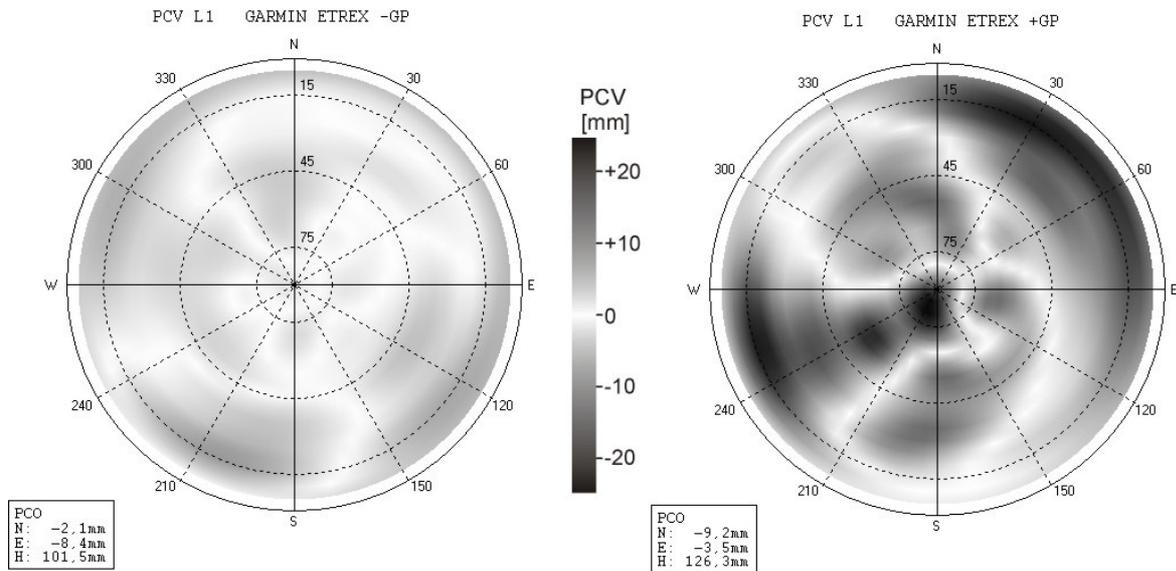


Abbildung 5: Antennenkorrekturen des Garmin eTrex Vista ohne Abschirmungsplatte (links, nur Gerätehalterung) und mit Abschirmungsplatte (rechts)

Die Basislinienmessungen, die im folgenden Kapitel beschrieben werden, wurden alle mit abschirmender Grundplatte durchgeführt. Insbesondere bei den gemischten Basislinien ist dann eine Verwendung der Antennenkorrekturen unbedingt notwendig, um die Mehrdeutigkeitsfestsetzung zu unterstützen und genauere Koordinatenergebnisse erzielen zu können.

5 Basislinienmessungen

5.1 Reine Garmin Basislinien

Das Ziel dieser Messungen war die Bestimmung des Potentials der Positionsbestimmungsgenauigkeit für Basislinien, bei denen beide Basislinienpunkte mit Garmin eTrex Vista Empfängern besetzt werden. Zum einen wurde hierfür die Basislinienlänge variiert, zum anderen wurden Punkte ausgewählt, bei denen Beugungs- oder Mehrwegeeffekte zu erwarten sind (vergleiche SCHWIEGER 2003). Um genaue Soll-Koordinaten für die Genauigkeitsanalyse zur Verfügung zu haben, wurden für die Messungen das Pfeilernetz der Universität Stuttgart in Stuttgart-Vaihingen genutzt (Abbildung 6). Für alle Pfeiler des Netzes liegen Koordinaten in mm-Genauigkeit vor.

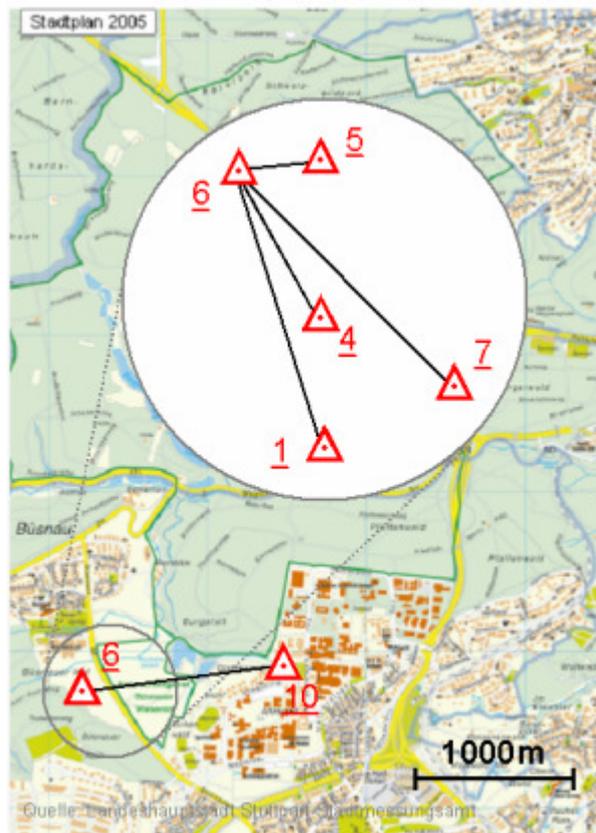


Abbildung 6: Pfeilernetz Vaihingen und gemessene reine Garmin Basislinien

Die Messungen wurden im Juni 2004 durchgeführt. Für alle gemessenen Basislinien wurde ein Garmin Empfänger auf dem Pfeiler 6 aufgebaut. Der zweite Garmin Empfänger besetzte hintereinander die Pfeiler 1, 4, 5, 7 und 10. Die gemessenen Basislinien sind Abbildung 6 zu entnehmen und weisen eine maximale Länge von 1,1 km auf. Pfeiler 1 ist zum Teil durch Bäume abgeschattet, so dass gestörte Signale zu erwarten sind. In unmittelbarer Umgebung des Pfeilers 10 Pfeiler steht ein Gebäude, daher können an diesen Punkt Mehrwegeeffekte auftreten. Bei der Messung wurden alle Daten ohne Elevationsmaske mit einer Rate von einer Sekunde aufgezeichnet. Aufgrund der Erfahrungen von SCHWIEGER (2003) wurden Beobachtungsräume von 0,5 Stunden geplant und umgesetzt. Die in Kapitel 3 beschriebenen und in Kapitel 4 zur Kalibrierung herangezogenen Garmin Adapter wurden inklusive Abschirmung eingesetzt.

Tabelle 2: Charakteristika für reine Garmin Basislinien

Pfeiler	5	4	1	7	10
Basislinienlänge [km]	0,12	0,26	0,45	0,45	1,1
Satellitenanzahl	7	8	7	8	6
Umgebung	frei	frei	Bäume	frei	Haus

Tabelle 2 zeigt die Charakteristika für die einzelnen Basislinien wie Basislinienlänge, Satellitenanzahl und Umgebungsbeschreibungen. Die Auswertung erfolgte mit der bereits beschriebenen Software Wa1 und einer Elevationsmaske von 5° Elevation. Für die Basislinien ohne Abschattungen gelang die Lösung ohne weiteren Eingriff in den Auswerteprozess.

Für die Basislinien zu den Pfeilern 1 und 10, die eine potentiell störende Umgebung aufweisen, mussten weitere Auswerteschritte angeschlossen werden. Für Pfeiler 1 wurden dabei sowohl die Satelliten PRN 20 und PRN 19 als auch die letzten 5 Minuten der Beobachtungsdaten eliminiert. Ähnliche Probleme waren für den Pfeiler 10 zu lösen. Hier war der Satellit PRN 25 zu eliminieren, um fehlerfreie Resultate zu erreichen. Diese Möglichkeiten eröffnen sich erst durch Analyse der Residuen.

Ohne diese zusätzlichen Eingriffe gelang es hier Wa1 also nicht, eine fehlerfreie Mehrdeutigkeitsfestsetzung durchzuführen. Falsch festgesetzte Mehrdeutigkeiten führen vielfach zu Koordinatenfehlern in der Größenordnung der Signalwellenlängen. Im Falle der Basislinie zu Pfeiler 1 betrug der ursprüngliche Koordinatenfehler 30 cm. Durch die zusätzlichen Auswertereingriffe konnte dieser grobe Auswertefehler beseitigt werden und es ergaben sich Restabweichungen von etwa 2 cm. Um das Auftreten solcher Fehlfestsetzungen unwahrscheinlicher zu machen, ist eine verbesserte Adaptierung der Wa1-Software an Garmin-Beobachtungsdaten notwendig.

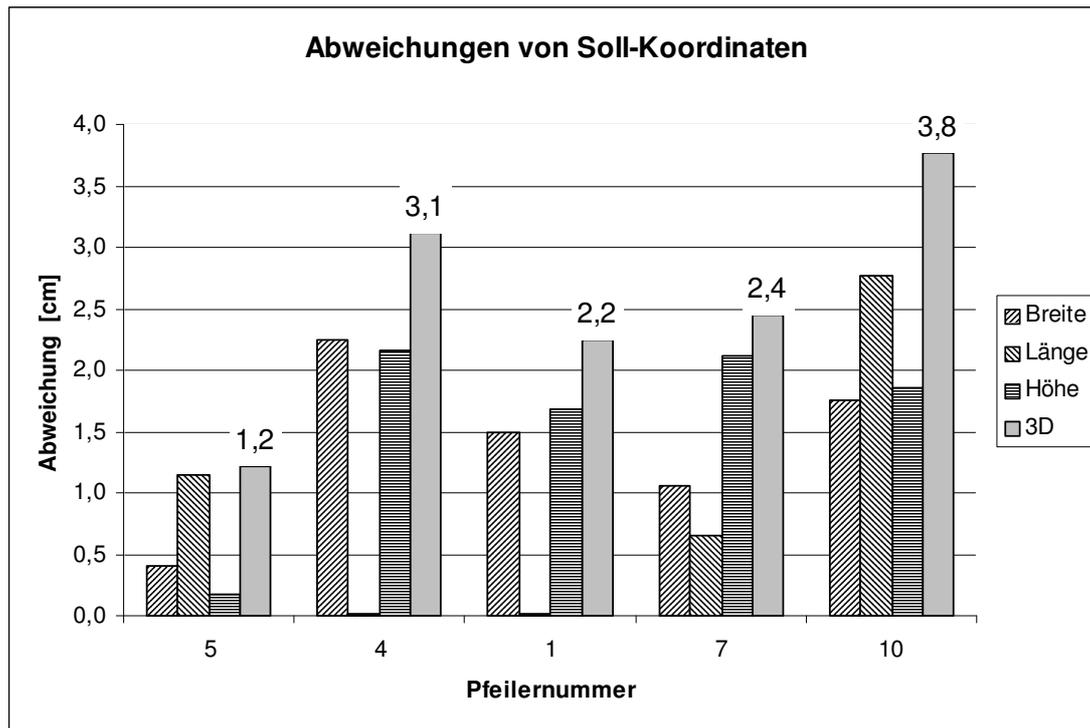


Abbildung 7: Abweichung der Koordinaten von den Pfeilerkoordinaten für reine Garmin Basislinien

Die in Abbildung 7 gezeigten Ergebnisse erlauben die Aussage, dass bei einer Beobachtungszeit von 30 Minuten und Basislinienlängen bis zu 1 km Genauigkeiten (Standardabweichungen) von 1,5 cm in den Lagekomponenten und besser als 2,0 cm in der Höhenkomponente erzielt werden können. Auswertungen für Stationen, die aufgrund von Beugungs- oder Mehrwegeeffekte gestörte Signale aufweisen, erfordern eine detaillierte Bearbeitung, führen aber letztendlich zu vergleichbaren Ergebnissen.

In SCHWIEGER u. GLÄSER (2005) wurden dieselben Basislinien mit der Software SKI-Pro der Firma Leica, die die Bestimmung von korrekten Mehrdeutigkeiten und Phasensprüngen für Garmin Empfänger nicht erlaubt, ausgewertet. Abbildung 8 stellt die dreidimensionalen Abweichungen zu den Soll-Koordinaten für die beiden Auswertungen zusammen. Es zeigt sich, dass bei Wa1-Ergebnissen deutlich geringere Abweichungen von den Soll-Koordinaten auftreten. Für ungestörte Stationen kam Wa1 ohne zusätzliche Auswertereingriffe wie Satellitenelimination aus, wogegen bei der Ski-Pro-Auswertung immer mindestens ein Satellit zu eliminieren war. Beide Vorteile sind auf die Möglichkeit zur Lösung der halben Mehrdeutigkeiten und Phasensprünge in Wa1 zurückzuführen.

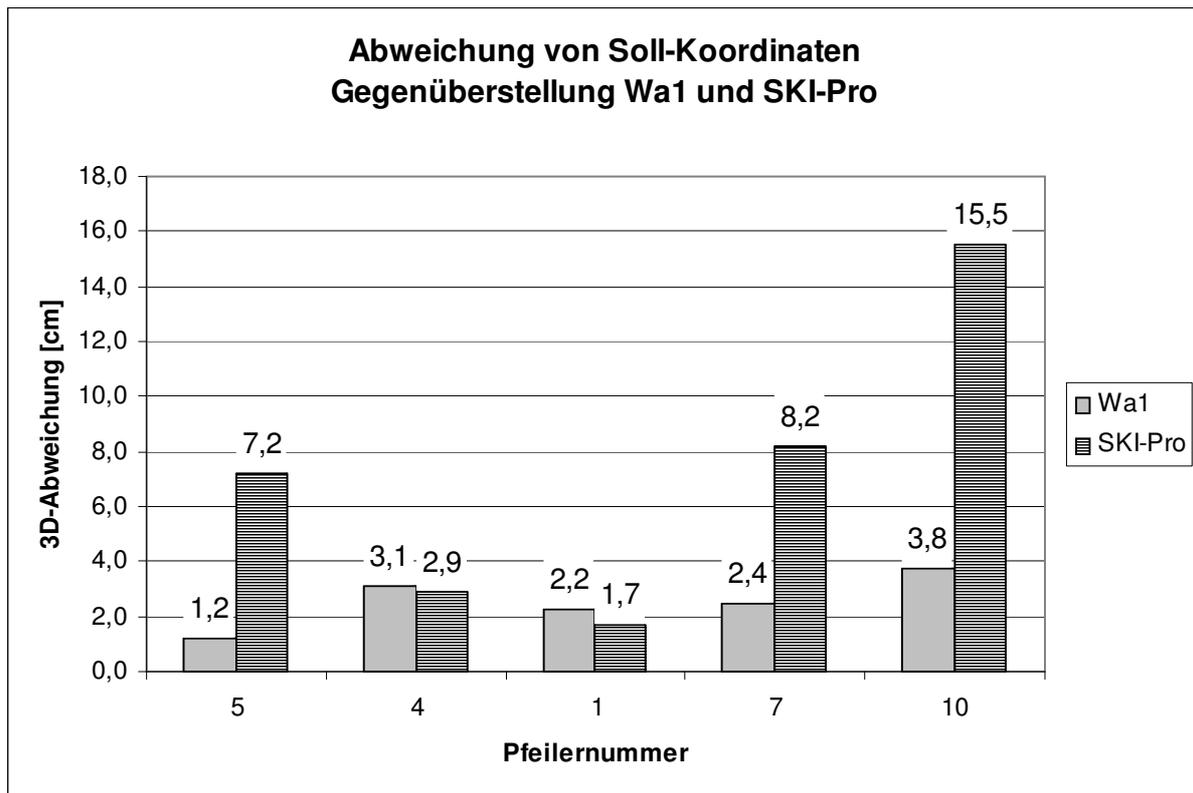


Abbildung 8: Gegenüberstellung der Ergebnisse von SKI-Pro und Wa1

5.2 Gemischte Basislinien

Ziel dieser Messungen war zum einen die Validierung der Kalibrierparameter und zum anderen die Untersuchungen des Einflusses unterschiedlicher Beobachtungszeiten auf die Genauigkeit der Basislinienbestimmung. Die Beobachtungen wurden wiederum im Pfeilernetz in Stuttgart-Vaihingen durchgeführt. Es wurden jeweils Basislinien mit einem Garmin eTrex Vista und einem Leica SR530 Empfänger beobachtet. Dabei wurde jeweils zweimal die Basislinien zwischen den Pfeilern 3 und 4 und den Pfeilern 5 und 6 bestimmt. Die Empfänger tauschten dabei die Position; zum Beispiel wurde die Basislinie von Pfeiler 3 nach Pfeiler 4 zunächst mit dem Garmin Empfänger auf Pfeiler 3 und nachfolgend auf Pfeiler 4 gemessen. Die Basislinienlängen betragen dabei durchgängig 120 m um Einflüsse der Basislinienlänge auszuschließen. Die Beobachtungszeiten lagen zwischen 0,6 und 4 Stunden. Die Messungen wurden gleichfalls im Juni 2004 durchgeführt. Das Aufzeichnungsrate betrug, wie in Abschnitt 5.2, eine Sekunde. Alle bei diesen Messungen besetzten Pfeiler weisen Horizontfreiheit auf. Abbildung 9 gibt einen Überblick bezüglich der beiden Basislinien und Tabelle 3 gibt die Charakteristika der vier gemessenen Basislinien an.



Abbildung 9: Gemischte Basislinien im Pfeilernetz Vaihingen

Tabelle 3: Charakteristika der gemischten Basislinien

Basislinie zwischen den Pfeilern	3 / 4	3 / 4	5 / 6	5 / 6
Garmin auf Pfeiler	3	4	5	6
Beobachtungszeit [h]	2,4	2,0	0,6	4,0
Basislinienlänge [km]	0,12	0,12	0,12	0,12
Satellitenanzahl	10	11	7	14

Für die Auswertung wurden absolute Antennenparameter sowohl für die Garmin eTrex Vista als auch für die Leica AT502 Antennen genutzt. Für beide Empfänger-Antennen Kombinationen wurde das ANTEX-Format genutzt, das die Integration der azimutabhängigen Terme der Phasenzentrumsvariationen erlaubt. Die Elevationsmaske wurde wiederum aufgrund der Antennenkalibrierparameter auf 5° Elevation gesetzt.

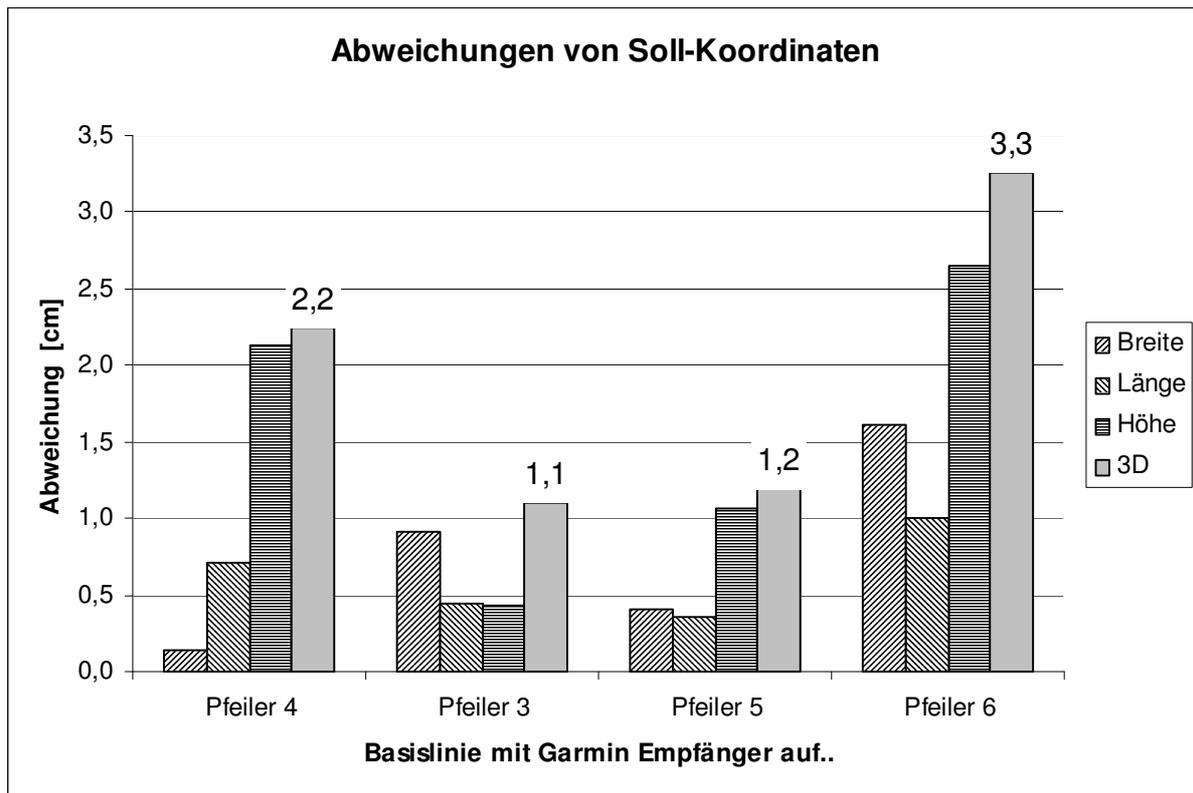


Abbildung 10: Abweichung der Koordinaten von den Pfeilerkoordinaten für gemischte Basislinien

Die Auswertung der gemischten Basislinien konnte ohne weitere Eingriffe in den Auswerteablauf mit Wa1 durchgeführt werden. Hierzu hat sicher die Auswahl der abschattungsfreien Pfeiler beigetragen. Das Genauigkeitsniveau ist mit dem der reinen Garmin Basislinien vergleichbar. Die Standardabweichungen liegen bei 1,0 cm für die Lagekomponenten und bei etwa 2,0 cm für die Höhe (vgl. Abbildung 10). Das zeigt, dass sich Garmin Daten und Leica Daten gemeinsam auswerten lassen, wenn die an der TU Dresden bestimmten Antennenparameter genutzt werden. Außerdem ist festzustellen, dass bei Basislinien von etwa 100 m Länge die Beobachtungsdauer keine Rolle spielt. Alle Koordinatenbestimmungen weisen dasselbe Genauigkeitsniveau auf, obwohl Beobachtungszeiten zwischen 0,6 und 4 Stunden umgesetzt wurden. Zu beachten ist, dass gerade die mit 4 Stunden am längsten gemessene Basislinie zwischen den Pfeilern 5 und 6 mit dem Garmin Empfänger auf Pfeiler 6 die größten Abweichungen von den Soll-Koordinaten aufweist.

5.3 Koordinatenlösungen aus Einzelepochen

Das volle Potential der Garmin eTrex Vista Phasendaten lässt sich erst erkennen, wenn die Einzelmessungen näher analysiert werden. Dies kann entweder in der Form von Doppel-Differenz-Beobachtungsresiduen geschehen oder in der Form von Koordinatenergebnissen aus Einzelepochen, also einer quasi-kinematischen Auswertung. Beispielhaft werden hier die Einzelepochen-Koordinatenergebnisse der am längsten gemessenen gemischten Basislinie dargestellt (Abbildung 11). Die Verwendung der an der TU Dresden bestimmten Garmin-Antennenkorrekturen war hier unverzichtbar.

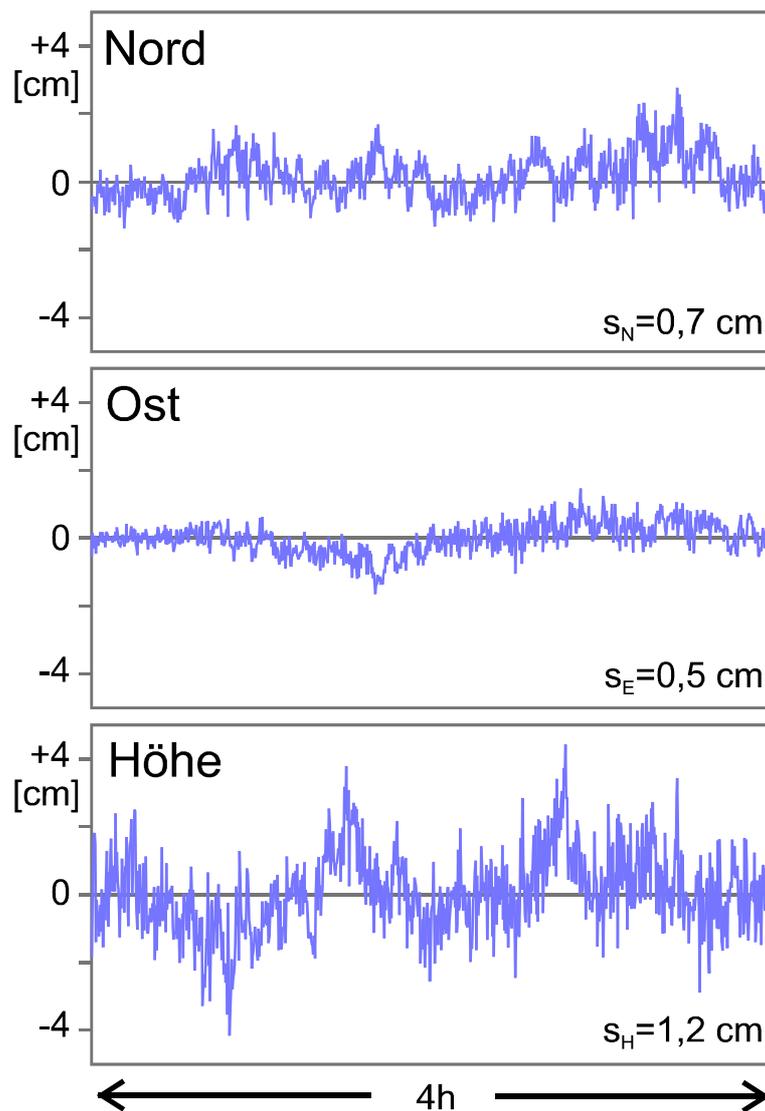


Abbildung 11: Einzelepochen-Koordinatenergebnisse für die gemischte Basislinie Leica (Pf. 5) und Garmin (Pf. 6), mittlere Abweichungen zur Solllösung beseitigt (vergleiche Abbildung 10)

Die Wiederholgenauigkeit der epochenweisen Koordinatenberechnungen liegt in einer Größenordnung wie man sie von geodätischen GPS-Empfängern auf kurzen Basislinien erwartet. Die Standardabweichungen betragen weniger als 1 cm in den Lagekomponenten und knapp über 1 cm in der Höhenkomponente. Dies zeigt, dass die Phasenbeobachtungsdaten des Garmin eTrex Vista Empfängers für präzise Anwendungen genutzt werden können, wenn die Festsetzung aller, also insbesondere der halben, Phasenmehrdeutigkeiten gelungen ist. Sie sind dann auch bei kinematischen Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen einsetzbar.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag konnte aufgezeigt werden, dass sich Navigationsempfänger vom Typ Gramin eTrex Vista eignen, um mit Hilfe der Phasendaten Standardabweichungen von 1 bis 2 cm in allen drei Koordinatenkomponenten zu erzielen. Voraussetzung ist aber eine Beobachtungsdauer von mindestens 30 Minuten, damit eine Mehrdeutigkeitsfestsetzung trotz der halben Mehrdeutigkeiten gelingt. Diese hohen Genauigkeiten sind auf kurze Basislinien beschränkt, da nur Einfrequenz-Beobachtungen vorliegen und somit keine ionosphärische Zweifrequenz-Korrektur möglich ist. Es ist aber unerheblich, ob reine Garmin Basislinien oder gemischte Basislinien in Kombination mit präzisen geodätischen GPS Empfängern gemessen werden. Für die zweite Variante sind Antennenkalibrierparameter erforderlich.

Entscheidend für die Auswertung der Garmin Phasendaten ist die Möglichkeit sogenannte halbe Mehrdeutigkeiten und Phasensprünge im Auswertegang zu berücksichtigen. Dies gelang mit Hilfe der Auswertesoftware Wa1. So konnte im Vergleich zu dem bisher eingesetzten Auswerteverfahren die Genauigkeit erheblich gesteigert und die Auswertung wesentlich vereinfacht werden.

Schwierigkeiten ergeben sich zurzeit noch bei Punkten, an denen verstärkte Signalstörungen, beispielsweise durch Mehrwegeinflüsse bedingt, auftreten. Hier mussten die Beobachtungsresiduen analysiert und manuell gestörte Signale eliminiert werden. Verzichtet man auf diese manuellen Eingriffe, so können sich grob falsche Ergebnisse ergeben. Hierfür sind noch verbesserte Algorithmen in Wa1 zu implementieren.

Die Einzelepochenergebnisse zeigen eine Wiederholgenauigkeit von ungefähr 1 cm in allen Koordinatenkomponenten. Sie fällt damit nicht erkennbar schlechter

aus als bei vielen geodätischen Empfängern. Das Potential des Garmin eTrex Vista beschränkt sich also nicht nur auf statische Messungen, sondern umfasst auch präzise kinematische Beobachtungen. Hierbei tritt dann aber die besondere Problematik der Mehrdeutigkeitsfestsetzung bei halben Wellenlängen noch deutlicher in den Vordergrund.

7 Literatur

- FREVERT, V., STÖCKER, D., NUCKELT, A. (2003): Beschleunigte Feldkalibrierung von GPS-Antennen. Proc. POSNAV 2003, 353-359.
- FREVERT, V., BLUMENBACH, TH., ROST, CH., WANNINGER, L. (2005): Beschleunigte Kalibrierung von GNSS-Antennen durch automatische Dreheinrichtung. Geodätische Woche 2005, Düsseldorf.
http://www.gi.geo.tu-dresden.de/gg/publikat/GW05_S6_02.pdf
- GALAN, A.T. (2000): Preliminary results of Postprocessing G12 raw data.
<http://artico.lma.fi.upm.es/numerico/miembros/antonio/async/node4.html>.
- GARMIN (2004): Garmin Device Interface Specification, Garmin Corporation, Olathe, Kansas USA. <http://www.garmin.com/support/commProtocol.html>.
- GRINGO (2000): GRINGO Software Homepage of Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy. <http://www.nottingham.ac.uk/iessg/gringo/>.
- HILL, C.J., MOORE, T., DUMVILLE, M. (2001): Carrier Phase Surveying with Garmin Handheld GPS Receivers. Survey Review, pp 135-141.
- HILL, C.J., MOORE, T., DUMVILLE, M. (1999): GRINGO – a RINEX logger for hand-held GPS receivers. Proceedings of ION GPS'99, Nashville, USA.
- SCHWIEGER, V., GLÄSER, A. (2005): Possibilities of Low Cost GPS Technology for Precise Geodetic Applications. Proceedings on FIG Working Week, Kairo, Ägypten, 16. - 21. April 2005.
- SCHWIEGER, V. (2003): Using Handheld GPS Receivers for Precise Positioning. Proceedings on 2nd FIG Regional Conference, Marrakech, Marokko, 2. - 5. Dezember 2003.