



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

GNSS-basierte Überwachungsmessungen mit dem Leica-Spider-System

Bachelorarbeit

im Studiengang Vermessungswesen

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering

eingereicht von:
Martin Scholz

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Karl Foppe

Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. (CDN) Elfriede Knickmeyer

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2013-0709-9

Dezember 2013

Kurzzusammenfassung

In der Arbeit werden das als Software für GNSS Referenzstationen und Netzwerken zum Einsatz kommende Leica GNSS Spider sowie die Analysesoftware Leica SpiderQC GNSS hauptsächlich im Hinblick auf den Einsatz in Echtzeitmonitoringsystemen genauer betrachtet und analysiert.

Um Aussagen über die Genauigkeit, die Handhabung und wirkende Einflüsse treffen zu können, wurden im praktischen Teil der Arbeit verschiedene Messungen mit mehreren Empfängern durchgeführt, ausgewertet und verglichen, die u. a. die Ziele verfolgten Aussagen über Abschattungseinflüsse, Langzeitkonstanz und ergebnisbezogene Trends bzw. Periodizitäten treffen zu können.

Es wurden Verschiebungen in der Lage und Versetzungen in der Höhe simuliert, beobachtet und verglichen, sowie entsprechende Genauigkeiten ermittelt. Auch Messungen zur Beobachtung von Abschattungseinflüssen und eine Langzeitmessung mit Ein- und Zweifrequenzempfängern wurden durchgeführt.

Dem experimentellen Teil gehen Beschreibungen der theoretischen Grundlagen und damit verbundener Zusammenhänge zur Optimierung von Fehlereinflüssen voran. Ebenfalls werden im Vorfeld Aufgaben, Aufbau und Arbeitsweise der integrierten Softwarelösung Leica GNSS Spider beschrieben.

Im Rahmen der Arbeit wurde eine Kurzanleitung erstellt, der eigene Erfahrungen zu Grunde liegen, wodurch Studierenden und anderen Interessierten eine effektive Handhabung von GNSS Spider ermöglicht wird.

Die durchgeführten und ausgewerteten Messungen sowie die im Rahmen der Arbeit verfasste Kurzanleitung sind ein erster Schritt, um die zunehmend in den Blick der Öffentlichkeit gerückten vollautomatischen Systeme zur Beobachtungen und Prognosen von Veränderungen an Bauobjekten und Landschaftsarealen zu optimieren.

Inhalt

1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielstellung.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Satellitengeodäsie und GNSS	4
2.1 Räumliche und zeitliche Referenzsysteme	7
2.2 Komponenten eines globalen Satellitennavigationssystems	9
2.3 Funktionsweise der GNSS	10
2.3.1 Navigationsnachrichten	11
2.3.2 Frequenzen und Codes	11
2.3.3 Codemessung.....	13
2.3.4 Trägerphasenmessung	13
2.4 GNSS-Vermessung.....	15
2.4.1 Statische Beobachtungsverfahren.....	16
2.4.2 Kinematische Beobachtungsverfahren	17
2.4.3 Fehlereinflüsse.....	22
3 Geodätische Überwachungsmessungen	25
3.1 Geodätische Messverfahren	27
3.2 Monitoring mit GNSS.....	27
4 Leica GNSS Spider	29
4.1 Überblick und Arbeitsweise	29
4.2 Durchführung einer Echtzeitüberwachungsmessung.....	31
4.2.1 Praktische Messanordnung	31
4.2.2 Konfiguration der Sensoren	35
4.2.3 Durchführung.....	36
4.2.4 Datenübernahme	41
4.3 Ergebnisse	46
4.3.1 Untersuchung von Langzeitbeobachtungen.....	46
4.3.2 Untersuchung von Verschiebungen.....	56
4.3.3 Untersuchung von Höhenänderungen	59
4.3.4 Untersuchung von Abschattungseinflüssen	60

4.4 Fazit und Ausblick	64
Anhang	68
Anhang I: Aufgabenstellung der Arbeit.....	68
Anhang II: Anleitung für Studierende	70
Anhang III: MATLAB – Einlesen Messdatei, grafische Ausgabe	85
Anhang IV: Regression und Signifikanztests Programm – MATLAB	87
Anhang V: Ergebnisse (Mittel) der Langzeitmessungen mit GMX901 und GMX902GG.....	89
Abbildungsverzeichnis	91
Tabellenverzeichnis.....	93
Abkürzungsverzeichnis.....	94
Literaturverzeichnis	97
Eidesstattliche Erklärung	100

1 Einleitung

1.1 Motivation

Im 21. Jahrhundert gewinnen permanente vollautomatische Monitoringsysteme im Bereich von Überwachungsmessungen zunehmend an Bedeutung.

Zwar verfügte die Menschheit schon in Antike und Renaissance über Erfahrungen beim Überwachen des baulichen Zustandes ihrer Architektur, jedoch war sie dabei lange Zeit zunächst auf die Beobachtung mit dem Auge und die Hilfe mechanischer Instrumente angewiesen.

Wichtige Ansätze für moderne Überwachungssysteme sind in der Ingenieurgeodäsie des 20. Jahrhunderts auszumachen, die im Bereich der Architektur neue Erfahrungen bei der Registrierung und Analyse geometrischer Veränderung an Bauwerken verschiedenster Art gewinnen konnte. Im Unterschied zu heute verfügte man jedoch auch dabei zunächst nicht über automatische Systeme. Messungen wurden in der Regel über längere Intervalle geplant und durchgeführt. Die oft im Laufe von Monaten und Jahren gewonnenen Messdaten mussten dann zu einem späteren Datum miteinander verglichen und ausgewertet werden.

Im Zuge der Digitalisierung und der damit verbundenen Entwicklung und Produktion automatisierter Messsysteme konnte als wichtiger Qualitätssprung der Übergang zur kontinuierlichen Erkundung und vollautomatischen Registrierung von Veränderungen im Laufe kleinster Zeitintervalle und damit im Zusammenhang die Datenanalyse und -distribution in Echtzeit vollzogen werden (EICHHORN, 2012).

Experimente und Entwicklungen in diesem Bereich wurden nicht zuletzt dadurch verstärkt, dass das Baugeschehen und der Trend zu immer größeren und komplexeren Bauvorhaben auf der Welt insgesamt zugenommen haben. Nicht nur in den USA und Europa, auch in Kanada und Australien, in Malaysia und den Vereinigten Arabischen Emiraten, in Japan und China sind auf Baugründen unterschiedlichster Beschaffenheit gigantische Bauwerke errichtet worden, die eine große Herausforderung für die Menschheit darstellen. Die generelle, zunächst oft unterschätzte Unberechenbarkeit der natürlichen Umgebung, aber auch Klimaveränderungen und andere Gefahren, die vom Menschen ausgehen, haben dazu beigetragen, das Bedürfnis nach intelligenten Überwachungssystemen zu verstärken.

Vernetzungen unterschiedlichster Art und das stetige Wachsen der Verkehrsinfrastruktur sowie die damit verbundenen Chancen und Risiken haben fast überall auf der Welt das Bedürfnis nach Kontrolle und Überwachung geweckt und verstärkt. So kommen im Interesse des Schutzes von Personen und Anlagen

Monitoringsysteme beispielsweise zum Einsatz, um die Standsicherheit von Türmen, Brücken, Tunneln und Staumauern zu prüfen und zu kontrollieren, oder um instabile Geländeoberflächen im Bereich von Gletschern, Küsten, Vulkanen bzw. Deponien zu beobachten. Auch Geländeänderungen durch Bergbau sind in diesem Zusammenhang als wichtiges Überwachungsobjekt hervorzuheben.

Mit dem Fortschreiten der Technik, besonders in den Bereichen Sensorik, Kommunikations- und Speichertechnologie, ist es dabei mittlerweile nicht mehr nötig Messepochen einzeln aufzunehmen und auszuwerten. Durch zunehmende Automation und mögliche Fernwartung können die Ergebnisse von Überwachungs- und Deformationsmessungen in Echtzeit und vom Projektgebiet entfernt abgerufen und analysiert werden.

Die Messverfahren selbst und ihre Genauigkeiten sind weiterentwickelt bzw. verbessert worden. So muss heutzutage beispielsweise nicht mehr zwingend die klassische Tachymeterlösung herangezogen werden; je nach Projekt ist es möglich auch andere, unter Umständen wirtschaftlichere Verfahren oder eine Kombination mehrerer in Betracht zu ziehen.

Seit der Einführung des amerikanischen Global Positioning Systems hat mit der oben beschriebenen Globalisierung auch der Auf- und Ausbau von Globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS) an Bedeutung gewonnen.

Die von der Industrie in unterschiedlichen Varianten bereitgestellten GNSS-Empfänger eignen sich aufgrund ihrer autonomen Einsatzmöglichkeiten und ihrer Wetterbeständigkeit als relativ kostengünstige Monitoringoption, wenn die jeweilige Aufgabenstellung und die damit verbundenen Anforderungen an Genauigkeit dies zulassen.

1.2 Zielstellung

Die renommierte Schweizer Firma Leica Geosystems AG mit Dependence in München hat mit Leica GNSS Spider eine oft nachgefragte Softwarelösung zur Vernetzung von modernen GNSS-Sensoren und zur Echtzeitberechnung von Koordinaten aus hochpräzisen differentiellen Messungen zur Verfügung gestellt, die aufgrund ihrer häufigen Verwendung in Industrie, Lehre und Forschung im Rahmen vorliegender Arbeit analysiert werden soll.

Eine wesentliche Zielstellung der Arbeit bestand darin, eine Kurzanleitung für Forschende und Studierende aufzubereiten.

Um Eigenschaften, Aufbau und Arbeitsweisen des Systems detaillierter beschreiben und analysieren zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit zunächst die

theoretischen Grundlagen behandelt und anschließend mehrere praktische Messungen geplant und durchgeführt. Nach Vergleich und Auswertung der Messdaten wurden die erreichten Genauigkeiten der bestimmten Deformationen ermittelt und bewertet. Des Weiteren finden im Rahmen dieser Arbeit Abschattungseinflüsse und Langzeitkonstanz des Systems Berücksichtigung.

Zur (Echtzeit-) Analyse und Auswertung wurde mittels MATLAB ein Programm zur grafischen Ausgabe und Beschreibung von Trends und Periodizitäten erstellt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Davon ausgehend ist vorliegende Bachelorarbeit im Grundsatz in vier Teile gegliedert. Zunächst wird im Anschluss an die Einleitung in Kapitel zwei in die theoretischen Grundlagen der Satellitengeodäsie und der Globalen Navigations-satellitensysteme eingeführt. Daran schließt Kapitel drei mit den geodätischen Überwachungsmessungen an, das insbesondere auf gängige Messverfahren und das Monitoring mit GNSS eingeht.

Im weiteren Verlauf ist Kapitel vier Leica GNSS Spider gewidmet, das zunächst vorgestellt und dann in seinen wichtigsten Funktionen beschrieben wird. Im letzten Teil der Arbeit wird die Echtzeitüberwachungsmessung mit praktischer Messanordnung, Konfiguration der Sensoren sowie Datenübernahme und -analyse dokumentiert. Dabei wird auch auf bei der Durchführung und Auswertung der Daten entstandene Fragestellungen und Lösungsansätze eingegangen.

Ein Fazit fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt Ausblicke für nachfolgende Forschungen.

Den Abschluss bilden im Anhang dokumentierte Unterlagen, zu denen nicht nur das Literatur-, Tabellen-, Abbildungs- sowie Abkürzungsverzeichnis, sondern auch die im Rahmen der durchgeführten Arbeit erstellte Anleitung für Studierende sowie Ergebnisse von Langzeitmessungen gehören. Außerdem befindet sich eine CD-ROM im Anhang, welche neben der Anleitung noch Messergebnisse und mit MATLAB geschriebene Programme enthält.

2 Satellitengeodäsie und GNSS

Über die *Helmert'sche Definition* der Geodäsie lässt sich der Begriff der *Satellitengeodäsie* ansatzweise erklären. Die Geodäsie wird bekanntlich als Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche, der Bestimmung des äußeren Erdschwerefeldes und des Meeresbodens sowie der Oberflächen und Schwerefelder anderer Himmelskörper unter Berücksichtigung zeitlicher Veränderungen beschrieben (TORGE, 2003, S. 2).

Daran anschließend verfolgt die Satellitengeodäsie das Ziel, zur Lösung o. g. Problemstellungen beizutragen. Dies kann und soll unter Anwendung von Beobachtungs- und Auswerteverfahren geschehen, die genaue Messungen bei der Satellitenbeobachtung ermöglichen und es auch erlauben Messungen innerhalb einzelner Elemente des Systems, beispielsweise zwischen künstlichen Satelliten oder von der Station zu einzelnen Satelliten, vorzunehmen.

Konkretisierte Schwerpunkte liegen dabei im Beobachten und Modellieren solcher geodynamischer Phänomene wie Pol- und Erdkrustenbewegungen sowie Erdrotationsschwankungen, der Geoidbestimmung und der Positionierung. Für diese Zwecke sind und werden stetig „präzise globale, regionale und lokale dreidimensionale Punktfelder“ mit entsprechenden Bezügen beschaffen (SEEBER, 1989, S. 1).

Um diese Aufgaben realisieren und bewältigen zu können, wurden u. a. *Globale Navigationssatellitensysteme* (GNSS) entwickelt. Diese haben sich etabliert, unterliegen natürlich dem stetigen Einfluss des Fortschritts und der Entwicklung.

1973 begann das US-amerikanische Militär mit der Entwicklung des NAVigation Satellite Timing And Ranging - *Global Positioning Systems* (NAVSTAR-GPS). Die Luftwaffe war von der Regierung mit der Entwicklung eines Ortungssystems beauftragt worden, welches ermöglichen sollte, wetter-, orts- und tageszeitunabhängig die Fragen nach der eigenen (dreidimensionalen) Position auf bzw. nahe der Erdoberfläche sowie nach Geschwindigkeit und Zeit zu beantworten.

Nach dem Start des ersten NAVSTAR-Satelliten im Jahre 1977 und dem Abschluss der damit verbundenen Überprüfungs-, Entwicklungs- und Ausbauphasen wurde das System schließlich am 17. Juli 1995 offiziell in Betrieb genommen (BAUER, 2011, S. 227).

Bedeutung und Nutzen eines solchen Echtzeitpositionierungssystems wurden relativ schnell erkannt und in einzelne Bereiche des zivilen Lebens übergeführt bzw. integriert. GNSS-Empfänger haben mittlerweile ihren Platz in vielen Autos,

Flugzeugen, Schiffen und anderen Geräten zum Zweck der absoluten Positionsbestimmung gefunden. Davon zu unterscheiden sind jedoch weiterführende Anwendungen in Bereichen der Forschung und der Industrie. Das Vermessungswesen gehört zu den weiterführenden Bereichen, für die satellitengestützte Navigations- und Positionierungssysteme unentbehrlich geworden sind. Diese kommen in den amtlichen Bereichen der Landesvermessung und des Liegenschaftskatasters vermehrt zum Einsatz.

Etwa zeitgleich mit dem Beginn der Entwicklung des GPS in den USA wurde in den 1970er Jahren auch in der damaligen UdSSR mit dem Aufbau eines GNSS begonnen. Ausschlaggebend für die Entwicklung des heute als *GLONASS* (GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) bezeichneten russischen Systems waren ebenfalls hauptsächlich militärische Gründe. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt gehören zum GLONASS-System 24 operationelle Satelliten. 1988 im Zuge der Perestrojka und unter dem Druck der Öffentlichkeit durch die Regierung beschlossen, einen offenen Dienst für zivile Nutzer bereitzustellen (IAC, 2013).

Tabelle 1: Überblick der Systemkomponenten GPS & GLONASS (KUMMER und FRANKENBERGER, 2010, S. 231)

	GPS	GLONASS
Anzahl Satelliten (aktiv + Reserve)	24 + 6	24 + 6
Orbitebenen	6	3
Satelliten je Bahnebene (+ Reserve)	5 + 1	8 + 2
Orbithöhe ü. Erdoberfläche	20200 km	19100 km
Inklination	55°	64,8°
Umlaufzeit	11 h 58 min	11 h 15 min
Referenzsystem	WGS84	PZ90.02
Referenzzeitsystem	$T_{GPS} = TAI - 19 \text{ s}$	$UTC_{Moskau} = UTC + 3 \text{ h}$

Neben diesen bereits operierenden Systemen gibt es weitere, die sich derzeit noch in der Entwicklung oder im Aufbau befinden. Es kann angenommen werden, dass diese ganz sicher in näherer Zukunft auch Bestandteile der Satellitennavigation sein werden. So zum Beispiel geben die Entwickler des GPS-kompatiblen europäischen Systems *Galileo* an, eine Verfügbarkeit erster Dienste für die Jahre 2014/15 vorzusehen. Hierbei handelt es sich um ein System für den zivilen Bereich, welches die Unabhängigkeit Europas auf dem Gebiet der Satellitennavigation demonstrieren soll. Auch deshalb stand bei der Entwicklung das Ziel im Vordergrund, ein in Krisensituationen zuverlässiges und eigenständig nutzbares Programm zu entwickeln. Mittlerweile wurden unter deutscher Beteiligung vier Galileosatelliten in die Umlaufbahn der Erde gebracht. Diese werden auch von einer Bodenkontrollstation in Oberpfaffenhofen aus überwacht. Für Ende dieses Jahres ist der Start zweier weiterer Satelliten durch die ESA vorgesehen. Bei Abschluss und mit Erreichen der vollen Operabilität sollen insgesamt 30 Satelliten im Einsatz sein (BMFVBS, 2013).

Speziell für Nutzer in Europa und Nordafrika haben Wissenschaftler unter der Leitung der ESA das System *EGNOS* entwickelt, das seit 2009 den offiziellen Betrieb aufgenommen hat und zusammen mit Galileo ein gemeinsames europäisches Navigationssystem für Nutzer in Europa und Nordafrika bilden soll.

Über 30 Satelliten soll auch das 2011 offiziell in Betrieb genommene chinesische System *Compass* (auch "Beidou-2") verfügen. Seine Fertigstellung ist Aussagen des Internationalen Komitees für GNSS zufolge ebenfalls 2020 vorgesehen (vgl. auch KUMMER und FRANKENBERGER, 2010).

Ein regionales Navigationssatellitensystem (RNSS) befindet sich zurzeit u. a. in Indien im Aufbau (IRNSS). Es soll aus sieben Satelliten, verteilt auf zwei Orbitebenen bestehen, drei in geostationärer und vier in geosynchroner Umlaufbahn. Die Satelliten auf der geostationären Bahn bewegen sich mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit wie ein Beobachter auf der Erdoberfläche und befinden sich, relativ gesehen, stationär über den Regionen. Unter dieser Konstellation (s. Abb. 1) sollen alle Satelliten in der indischen Region rund um die Uhr beobachtbar sein. Die Signale werden auf den Frequenzbändern L5 und S in Form eines öffentlichen Standard-Positionierungsservices und einem Service für einen beschränkten Typ von Nutzern bereitgestellt (MAJITHIYA et al., 2011). Der erste Satellitenstart wurde im Juli, 2013 erfolgreich durchgeführt, die volle Operabilität soll bis 2015 erreicht werden (NOIDA, 2013).

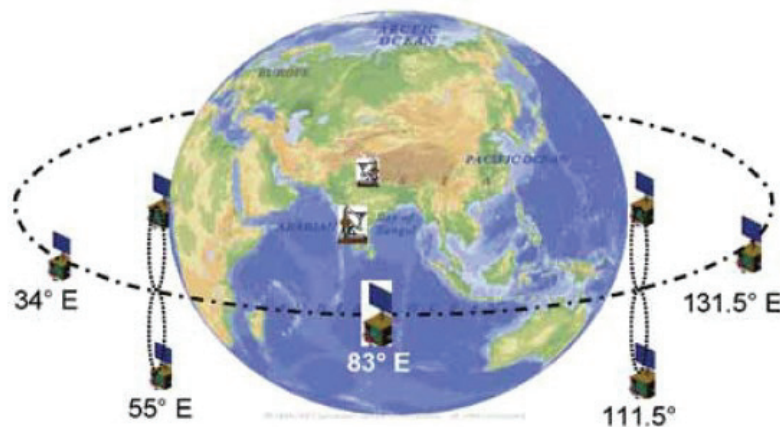


Abbildung 1: Konstellation des IRNSS (MAJITHIYA et al., 2011)

Die meisten modernen GNSS-Empfänger können Signale von GPS- und GLONASS-Satelliten empfangen und verarbeiten. Das gilt auch für zwei Empfänger der Firma Leica, mit denen die praktischen Messungen dieser Arbeit durchgeführt wurden, um stabile Positionierungsgenauigkeiten zu gewährleisten.

Aus diesem Grund erscheint es im Interesse der Ausgangsfragestellung dieser Arbeit notwendig, die beiden Systeme genauer zu beschreiben und miteinander zu vergleichen.

Das Bestimmen der Position basiert auf der Messung von Pseudostrecken zwischen den systemeigenen Satelliten und dem GNSS-Empfänger. Dafür stehen zwei verschiedene Verfahren zur Verfügung, die *Codephasen* sowie die *Trägerphasenmessung*.

Beide Verfahren liefern Ergebnisse unterschiedlicher Genauigkeiten; die Verfügbarkeit hängt dabei von dem einzelnen Empfänger ab (vgl. BAUER, 2011, S. 165 ff.).

2.1 Räumliche und zeitliche Referenzsysteme

Die globale geodätische Grundlage für Positionsangaben des GPS ist das geozentrisch gelagerte räumliche *World Geodetic System 1984* (WGS84). Es wird durch die Koordinaten der Bodenstationen des GPS-Kontrollsegments realisiert (s. Abb. 2) und ist nahezu identisch mit dem *International Terrestrial Reference System* (ITRS).



Abbildung 2: GPS-Bodensegment (BAUER, 2011)

Das Koordinatensystem des WGS84 ist ein rechtshändiges, erdfestes und orthogonales Koordinatensystem und wird nach den Vorgaben des *IERS* (International Earth Rotation Service) folgendermaßen definiert:

- Ursprung – Erdmassenschwerpunkt
- Z-Achse – Richtung des IERS Referenz Pols (IRP)
- X-Achse – Schnittpunkt des IERS Referenz Meridians (IRM) und der Ebene, die durch den Ursprung und orthogonal zur Z-Achse verläuft
- Y-Achse - orthogonal zu X- und Z-Achse

Der Koordinatenursprung ist ebenfalls das geometrische Zentrum des WGS84-Ellipsoids und die Z-Achse dessen Rotationsachse.

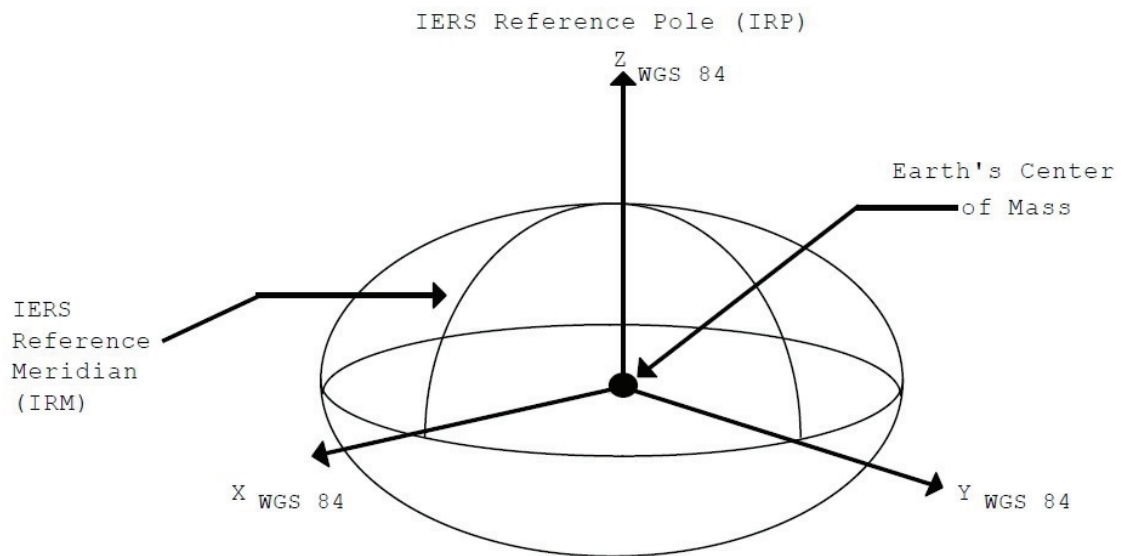


Abbildung 3: Definition des WGS84-Koordinatensystems (NIMA, 2000)

Neben diesen geometrischen Festlegungen des WGS84-Koordinatensystems und des WGS84-Ellipsoids werden u. a. auch Konstante wie a (große Halbachse), f (Abplattung), Ω (Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation), c (Lichtgeschwindigkeit im Vakuum), GM (Produkt der Gravitationskonstante und Erdmasse – mit und ohne Atmosphärenmasse) deklariert. Außerdem finden ein mathematisches Modell des Schwerfelds der Erde und weitere Deklarationen Berücksichtigung, die das System als ein Ganzes definieren (NIMA, 2000).

Neben dem grundsätzlich wichtigen Raumbezug sind auch zeitliche Referenzsysteme für globale Navigationssatellitensysteme von höchster Bedeutung. Die GPS-Zeit wird in GPS-Wochen ab dem 06.01.1980 gezählt. Als Wochenbeginn fungiert jeweils Sonntag Null Uhr. Zu dem oben genannten Datum war die GPS-Zeit mit der *Universal Time Coordinated* (UTC) synchronisiert. Während bei GPS jedoch auf einer gleichmäßigen Zeitskala ohne Schaltsekunden gezählt wird, werden letztere gelegentlich ganzzahlig bei der UTC eingefügt, um sie der *Universal Time 1* (UT₁) anzupassen, welche auf den ungleichmäßigen Einflüssen der Erdrotation basiert. Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt wurden 16 Schaltsekunden eingeführt, damit gilt $T_{\text{GPS}} - \text{UTC} = 16 \text{ s}$. Zukünftig werden die GPS-Zeit und UTC dementsprechend weiter auseinanderlaufen. Der *Internationalen Atomzeit* (TAI) folgt die GPS-Zeit mit einem Offset von 19 s (JOECKEL et al., 2008, S. 64).

Bei GLONASS ist das räumliche Referenzsystem das *PZ90.02* („Parametri Zemli 1990“ zu dt. „Erdparameter 1990“, zuletzt aktualisiert auf Version 02). Es handelt sich dabei um eine Weiterentwicklung des früheren Sowjetischen Geodätischen Systems 1985 (*SGS85*). Dieses hieß zunächst SGS90 und wurde später in PZ90 umbenannt. Orientiert am *International Terrestrial Reference Frame 2000* (ITRF2000) unterscheidet es sich von diesem lediglich in den Translationen um $\Delta X = -36 \text{ cm}$, ΔY

= +8 cm und $\Delta Z = +18$ cm. Ellipsoidparameter und die wesentlichsten Festlegungen wie GM , Ω , c und andere stimmen mit denen des WGS84 überein. Ein Wechsel zwischen WGS-84 und PZ90.02 kann mittels der *Helmert-Transformation* (Sieben-Parameter-Transformation) vollzogen werden.

Im Gegensatz zu GPS bezieht sich die GLONASS-Zeit auf die *koordinierte Weltzeit* UTC. Generiert wird sie mittels Wasserstoff-Maser-Oszillatoren („Central Clock“) in der Bodenkontrollstation Schelkovo (bei Moskau) mit einer Instabilität unter $2 \cdot 10^{-15}$. Sie wird jährlich mit der UTC(SU) (Soviet Union) synchronisiert. Außerdem besteht noch ein konstanter Unterschied von drei Stunden zwischen der GLONASS- und der UTC_{SU}-Zeit.

$$t_{\text{GLONASS}} = \text{UTC}_{\text{SU}} + 3 \text{ h}$$

Die Systemzeit ist in den GLONASS-*Navigationsnachrichten* enthalten und wird über diese den Nutzern mitgeteilt. Da ihr Unterschied zur UTC_{SU}-Zeit unter einer Millisekunde beträgt, und dieser mit einer Genauigkeit von einer Mikrosekunde bekannt ist, entspricht die GLONASS-Zeit der Moskauer Zonenzeit. Auch die Differenz zur GPS-Zeit ist in den GLONASS-Navigationsnachrichten erhalten (BAUER, 2011, S. 231 f., 272 f.).

2.2 Komponenten eines globalen Satellitennavigationssystems

SEEBER (1989, S. 244) beschreibt die Unterteilung der GNSS in drei Segmente:

- das *(Welt-)Raumsegment* mit den signalaussendenden Satelliten,
- das *Kontrollsegment* zur Kontrolle des gesamten Systems mittels Bodenkontrollstationen und
- das *Nutzersegment* mit den verschiedenen Empfängern.

WANNINGER (2000) ergänzte später diese Sichtweise noch um das Segment der, von verschiedensten Serviceanbietern betriebenen, *Referenzstationen*.

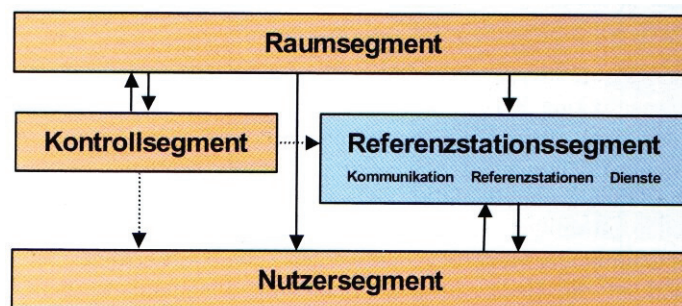


Abbildung 4: Segmente eines GNSS (KUMMER und FRANKENBERGER, 2010, S. 230)

Die Satelliten sind dabei zusammen mit den Reservesatelliten des Weltraumsegmentes sind dabei auf eine unterschiedliche Anzahl von Umlaufebenen i. d. R.

gleichmäßig (bei GPS ungleichmäßig) verteilt, so dass von jedem Punkt der Erdoberfläche aus eine ausreichende Anzahl an Satelliten beobachtet werden kann. Im Falle des GPS wird zum Beispiel die Abdeckung bei einer Mindestelevation von 15° mit vier bis acht sichtbaren Satelliten angegeben, bei 10° mit bis zu zehn Satelliten (HOFMANN-WELLENHOF, 1997, S. 12).

Der technische Aufbau von GNSS-Satelliten unterscheidet sich zwischen den einzelnen Systemen, aber auch innerhalb dieser zwischen den verschiedenen Baureihen (Generationen).

Zu dem Kontrollsegment (auch Bodensegment) gehören Überwachungsstationen, Zentralstation und Sendestationen. Durch ihr Zusammenwirken können sie die Satelliten überwachen und gegebenenfalls deren Positionen korrigieren. Die Hauptaufgabe des Bodensegmentes liegt in der Erzeugung der Navigationsdaten für die Satelliten.

Dem Nutzersegment werden alle zivilen und militärischen GNSS-Nutzer zugeordnet, wobei die Anzahl ersterer schon seit längerem die der militärischen bei Weitem übersteigt.

Als Nutzer zählt jeder, der eine Empfangsanlage besitzt bzw. betreibt. Die Empfangsanlage besteht aus einer satellitensignalempfangenden Antenne und einem signalverarbeitenden Empfänger (WITTE u. SPARLA, 2011, S.411 f.).

Das Segment der Referenzstationen lässt sich im Rahmen von Echtzeitlösungen weiter in die Komponenten Referenzstationen, Kommunikation und Dienste unterteilen. Zusätzlich zu den *GNSS-Signalen* des Raumsegmentes empfängt der Nutzer auch *Korrekturdaten* des Referenzsegmentes. Damit wird eine genaue Echtzeitpositionierung gewährleistet. Dafür stehen verschiedene Referenzdienste zur Verfügung. Diese haben die Möglichkeit, Störungswarnungen innerhalb der Systeme unabhängig zum Kontroll- und Raumsegment an den Nutzer zu übertragen. Genauer zum Referenzstationssegment wird in dieser Arbeit Abschnitt 2.1.4 beschrieben (WILLGALIS, 2005, S. 81 f.).

2.3 Funktionsweise der GNSS

Das den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen zugrundeliegende Navigationsprinzip von GNSS beruht auf der Ein-Weg-Entfernungsmessung zwischen dem Empfänger und den Satelliten.

Die genutzten Verfahren sollen in diesem Abschnitt unter Berücksichtigung der dafür erforderlichen Elemente behandelt werden.

2.3.1 Navigationsnachrichten

Die Navigationsnachricht besteht aus Informationen, die eine genaue Positionierung ermöglichen. Sie wird von den Satelliten an den Empfänger über verschiedene Frequenzen des L-Bands gesendet. Es werden unter anderem Parameter für Uhrenkorrekturen und die Bahndaten (*Ephemeriden*) der Satelliten übermittelt.

Die GPS- und GLONASS-Signale werden mit einer Datenrate von 50 bit/s ausgesendet. Aufgrund der unterschiedlichen Länge der Nachrichten, benötigt eine ganze GPS-Navigationsnachricht (1500 bit) 30 s, bei GLONASS (85 bit) 1,7 s für die Übertragung (BAUER, 2011, S. 234 ff., S. 269 ff.).

Die Navigationsnachrichten beider Systeme unterscheiden sich in ihrem Aufbau. So werden zum Beispiel im Falle des GPS die Ephemeriden mittels KEPLER-Elementen übertragen, während diese bei GLONASS in Form von Koordinaten-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren bereitgestellt werden. Ein weiterer wesentlicher Unterschied besteht derzeit noch in der Signalübertragung, genauer in der Art des verwendeten *Mehrfachzugriffs*. Bei GPS können sich alle Satelliten durch die Verwendung verschiedener Codes bzw. Code-Mehrfachzugriffs die gleichen Frequenzen teilen (Code Division Multiple Access, CDMA), während die GLONASS-Satellitensignale aus identischen Codes bestehen und durch einen Frequenz-Mehrfachzugriff (Frequency Division Multiple Access, FDMA) jedem Satelliten zwei eigene Sendefrequenzen zugeteilt werden. Diese unterscheiden sich nur geringfügig. Das russische System soll zukünftig um das CDMA-Verfahren, welches auch bei GALILEO und COMPASS genutzt werden soll, ergänzt werden (FLÜHR, 2012, S.117 ff.).

2.3.2 Frequenzen und Codes

Das GPS-Signal wird parallel mittels Frequenzspreizung auf aktuell drei Frequenzen ausgesendet:

- L1-Frequenz (1575,42 MHz): *C/A-* („Coarse/Acquisition“) und *P(Y)-Code* („Precision/encrypted“),
- L2-Frequenz (1227,60 MHz): *P(Y)-Code*.
- L5-Frequenz (1176,45 MHz): *I5-* und *Q5-Code*

Mehr-Frequenz-Empfänger können alle bzw. eine Auswahl dieser Frequenzen parallel empfangen. Damit kann eine gesteigerte Genauigkeit gegenüber Einfrequenzempfängern (nur L1) erreicht werden. Diese wird durch *Differenzbildung* (Bestimmung ionosphärischer Effekte) erlangt.

Die Trägerfrequenzen L1 und L2 werden in einem zufälligen Impulscode, dem *PRN-Code* (Pseudo Random Noise) moduliert und stehen für zivile (C/A-Code) bzw. militärische (P(Y)-Code) Nutzungen zur Verfügung.

Tabelle 2: Signalcodes (BAUER, 2011, S. 238 ff.)

	Codefolge	Periodendauer	Sendefrequenz
C/A-Code (Grob-Code)	pseudozufällig	1 ms	1,023 MHz
P(Y)-Code (genauer Code)	pseudozufällig	267 d	10,23 MHz
I5-Code	NEUMAN-HOFFMAN	1 ms	10,23 MHz
Q5-Code	NEUMAN-HOFFMAN	1 ms	10,23 MHz

Aufgrund der langen Periodendauer des P(Y)-Codes, wird dieser so geteilt, dass jedem Satelliten ein sieben Tage umfassender Teil der Periodendauer zugewiesen wird.

Bis zum Jahr 2000 wurde der zivile P-Code mit dem geheimen (militärisch genutzten) Y-Code kombiniert. Da der Code aus militärisch-strategischen Gründen künstlich verfälscht wurde, konnten zivile Nutzer damit nur eine Navigationsgenauigkeit von etwa 100 m erreichen. Zur Kennzeichnung wurde „*Selective Availability*“ (SA) genutzt. Lediglich mit den dazugehörigen Korrekturdaten war eine genauere Nutzung möglich (MISCHKE, 2013, S. 2).

Weiterhin senden Satelliten neuerer Generationen zusätzlich auf einer dritten, der L5-Frequenz (1176,45 MHz) aus. Dadurch sollen die Datensignale weiter stabilisiert werden. Die Empfänger weisen eine bessere Robustheit auf. Auch soll diese Frequenz in der Luftfahrt und für *Safety-of-Life*-Anwendungen (SoL) genutzt werden können (U.S. GOVERNMENT, 2013).

Das L5-Signal wird durch das Multiplex-Verfahren der sogenannten Quadraturmodulation in zwei unterschiedliche Datenströme (I5- und Q5-Codes und -kanäle) geteilt und dadurch verschlüsselt. Die Verschlüsselung der Codes wird mit der Aufmodulation von Neuman-Hoffman-Bitfolgen erreicht. Diese sind für jeden Satelliten gleich, unterscheiden sich jedoch für die beiden Kanäle (10 und 20 bit) (BAUER, 2011, S. 255).

Im Zuge der Modernisierung des GPS wurde die L2-Frequenz mit L2C um einen weiteren Code ergänzt. Dieses zivile kommerzielle Signal verspricht unter anderem eine schnellere Signalerfassung, verstärkte Zuverlässigkeit und eine Erweiterung der räumlichen Einsetzbarkeit.

Die Sendefrequenzen von GLONASS liegen wie bei GPS im L-Band. Um sie besser von denen des GPS unterscheiden zu können, sind auch die Bezeichnungen G1 und G2 gebräuchlich.

$$f_{k,1} = 1,602 \text{ MHz} + (k - 1) \cdot 0,5625 \text{ MHz} \quad (\text{G1})$$

$$f_{k,2} = 1,246 \text{ MHz} + (k - 1) \cdot 0,4375 \text{ MHz} \quad (\text{G2})$$

Dabei steht k für jeweils einen der 24 Satelliten. Welcher k-Wert welchem Satelliten zugeordnet ist, also welcher Satellit welche Frequenz aussendet, steht in der

Navigationssnachricht. Ähnlich wie bei dem amerikanischen System im Rahmen der Verbesserung der Satelliten und somit der Genauigkeit wurde die L2-Frequenz um ein weiteres ziviles Signal ergänzt. Ein drittes befindet sich in der Einführung. Der Wechsel zwischen bzw. die Kombination von FDMA und CDMA soll der Kompatibilität zu den anderen GNSS dienen (BAUER, 2011, S. 273 ff.).

2.3.3 Codemessung

Die Codemessung findet Anwendung bei der absoluten (ein Empfänger), aber teilweise auch bei der *relativen Positionierung* (mindestens zwei Empfänger) und beruht auf der Messung sogenannter *Pseudoentfernungen*. Die Bestimmung der Distanz zwischen Empfangsantenne und Satellit erfolgt durch Korrelation des Satellitensignals mit einer im Empfänger erzeugten Kopie des Codes. Dabei werden Aussendezeitpunkt am Satelliten und Empfangszeitpunkt am Empfänger miteinander verglichen. Auf Grund der Länge des Codes kann die Pseudoentfernung im Falle von GPS nur mit einer Mehrdeutigkeit von 300 km ermittelt werden.

Da im Empfänger keine hochgenaue Atomuhr arbeitet und die Uhren von Satellit und Empfänger nicht miteinander synchronisiert sind, enthält die aus der Signallaufzeit abgeleitete Distanz darüber hinaus einen systematischen Fehler (Uhrfehler). Dieser Synchronisationsfehler (Bias) ist der Grund für die Bezeichnung Pseudoentfernung. Ein Uhrfehler von 10^{-2} s hat eine Positionsverschiebung von ca. 3000 km zur Folge. Um eine Genauigkeit von 1 m zu erreichen, muss die Laufzeit auf besser als $3 \cdot 10^{-9}$ s genau bestimmt werden.

Da die Satellitenuhren untereinander synchron laufen, können die Koordinaten des GNSS-Empfängers analytisch berechnet werden. Für eine eindeutige Lösung (Lage und ellipsoidische Höhe) werden vier Satelliten benötigt (BAUER, 2011, S. 52 f.).

Mit der Codemessung werden im Allgemeinen Genauigkeiten von unter 10 m erreicht, mittels moderner GNSS-Empfänger liegen diese unter 0,5 m. Verbreitet ist der Einsatz vor allem bei der Navigation von Fahrzeugen oder Schiffen, sowie in solchen Bereichen, in denen wie beispielsweise bei Sport- und Freizeitaktivitäten keine höheren Genauigkeiten erforderlich sind (WITTE u. SPARLA, 2011, S. 411 ff.).

2.3.4 Trägerphasenmessung

Für Genauigkeiten im Zentimeter- bzw. Millimeterbereich müssen Messungen der Trägerphase herangezogen werden. Diese, besonders in der Geodäsie geforderten Genauigkeiten sind mit *Differential-GNSS* zu erreichen, wenn mindestens zwei Empfänger zum Einsatz kommen. Dabei wird die Trägerwelle zur Distanzmessung zwischen Satelliten und Empfänger genutzt. Dies geschieht nach dem Prinzip des Phasenvergleichsverfahrens.

Dabei wird im Empfänger ein Referenzsignal erzeugt, welches mit der Phase der eingehenden Trägerwelle verglichen wird. Da Empfänger und Satellit sich relativ zueinander bewegen, muss außerdem die DOPPLER-Frequenzverschiebung bestimmt werden.

Die Phase, d. h. der Abstand vom letzten Nulldurchgang einer elektromagnetischen Welle, lässt sich sehr genau messen. Es ist problemlos möglich, die Phase mit einer Genauigkeit von unter einem Millimeter zu bestimmen. Als problematisch erweist sich hierbei jedoch die Bestimmung der Gesamtanzahl der Wellenzüge zwischen Sender und Empfänger und die daraus entstehende *Phasenmehrdeutigkeit* (ambiguity).

Für die Bestimmung der Mehrdeutigkeit stehen verschiedene Verfahren zu Verfügung, die in geometrische und analytische unterteilt werden. Die geometrische Methode basiert auf der Tatsache, dass sich die Geometrie zwischen Empfänger und Satellit während einer Messung ändert, während die Mehrdeutigkeit konstant bleibt. In diesem Fall werden längere Beobachtungen mit vielen Beobachtungsgleichungen benötigt. Dahingegen können mit Hilfe von Suchalgorithmen (d. h. analytisch) Näherungslösungen in relativ kurzen Zeiten gefunden werden. Je mehr Satelliten dabei für die Berechnungen zur Verfügung stehen, desto zuverlässiger und schneller kann eine Lösung herbeigeführt werden. Bei *Real Time Kinematic* – Messungen (RTK) wird auf diese Lösung zurückgegriffen. Dies geschieht oft in Kombination mit der Codemessung, aus welcher sich erforderliche Näherungskordinaten berechnen lassen. So werden Pseudostrecken durch Codemessung errechnet, welche weniger durch *Mehrwegeeinflüsse* oder *Messrauschen* beeinflusst werden (Carrier-Smoothed Pseudorange). Für das Auflösen der Phasenmehrdeutigkeiten wird der Begriff *Initialisierungsphase* verwendet (BAUER, 2011, S. 413 ff.).

Die im Rahmen dieser Arbeit genutzten zwei verschiedenen Empfängertypen der Firma Leica Geosystems wurden laut Hersteller speziell für Überwachungsmessungen entwickelt. Auch wurden sie so konzipiert, dass eine nahtlose Anbindung an das Leica GNSS Spider System möglich ist. Das System soll dabei als (Fern-) Bedienungssoftware fungieren.

Für die Simulation der Überwachungsmessung kamen zwei GMX902 GG Empfänger in Kombination mit zwei dazu kompatiblen AS10-Antennen zum Einsatz. Die Antennen empfangen die Signale der Navigationssatelliten, während die Funktion der Empfänger in der Berechnung der Entfernungen zu diesen Satelliten liegt. Das Kürzel „GG“ weist daraufhin, dass mit diesen Geräten Signale von GPS- und auch GLONASS-Satelliten gemessen und ausgewertet werden können. Auch ist dies in Echtzeit möglich. Die Anzahl simultan beobachtbarer Satelliten liegt bei 14 auf L1 und L2 für GPS und bei 12 auf L1 und L2 für GLONASS. Dabei werden Code- und auch Trägerphasenmessungen auf beiden Frequenzen ausgeführt (LEICA GEOSYSTEMS AG, *GMX902*, 2007).



Abbildung 5: GMX902 GG-Empfänger & AS10, GMX901 (LEICA GEOSYSTEMS AG, 2013)

Zu Vergleichs- und Experimentierzwecken fand zusätzlich ein GMX901-Empfänger seine Verwendung. Auch damit lassen sich Code und Trägerphasen in Echtzeit messen. Antenne und Empfänger sind in einem Bauteil kombiniert. Der wesentliche Unterschied zum GMX902-Empfänger ist jedoch, dass es sich hierbei nicht um einen Zwei-, sondern um einen Einfrequenzempfänger handelt. Es ist zu bemerken, dass damit keine GLONASS-Satelliten beobachtet werden können; lediglich ein simultaner Empfang von 12 GPS-Satelliten auf L1 ist möglich (LEICA GEOSYSTEMS AG, *GMX901*, 2007).

Inwieweit sich diese Faktoren auf die Genauigkeiten auswirken soll anhand einer Langzeitmessung evaluiert werden.

2.4 GNSS-Vermessung

Während sich allgemeine Aufgaben der Ortung und Navigation gut mittels absoluter Positionierung bewältigen lassen, genügen die damit erzielten Genauigkeiten jedoch nicht mehr den Anforderungen in solchen Bereichen wie der Schiffsnavigation in Küsten- und Hafengebieten oder dem Landeanflug von Flugzeugen. Auch für die Aufgaben des Vermessungswesens ist der Einsatz komplexerer Verfahren mit gesteigerten Genauigkeiten unbedingt erforderlich. In allen diesen Fällen bieten sich differentielle Positionierungsverfahren für den Einsatz an.

Diese genannten Verfahren beruhen hauptsächlich auf der Benutzung der Trägerphasenmessung. Die Genauigkeitssteigerung wird dabei durch Verwendung von mindestens zwei Empfängern erreicht, die gleichzeitige Messungen zu ein und denselben Satelliten durchführen. Einer dieser Empfänger ist die sogenannte *Referenzstation*. Sie befindet sich für gewöhnlich auf einem (mit hochpräzisen geodätischen Mitteln bestimmten) bekannten Punkt, bei dieser Arbeit wurde dafür ein amtlicher Benutzungsfestpunkt der Hierarchiestufe D gewählt. Der andere Empfänger trägt die Bezeichnung *Rover* oder auch Nutzer und befindet sich nahe der Referenzstation (KAPLAN, 1996, S. 322 f.).

Die Auswertung erfolgt aus der Differenzbildung der gleichzeitig gemessenen Trägerphasen zwischen zwei Satelliten und dem Empfänger. Diese Bestimmungen

sollten es ermöglichen, Fehler wie u. a. Satellitenuhrfehler zu eliminieren. Einflüsse der *Troposphäre* und *Satellitenbahnfehler* werden damit deutlich minimiert. Dabei wird nach der Bildung von Einfach-, Zweifach- und Dreifachdifferenzen unterschieden (MANSFELD, 1998, S. 226 f.).

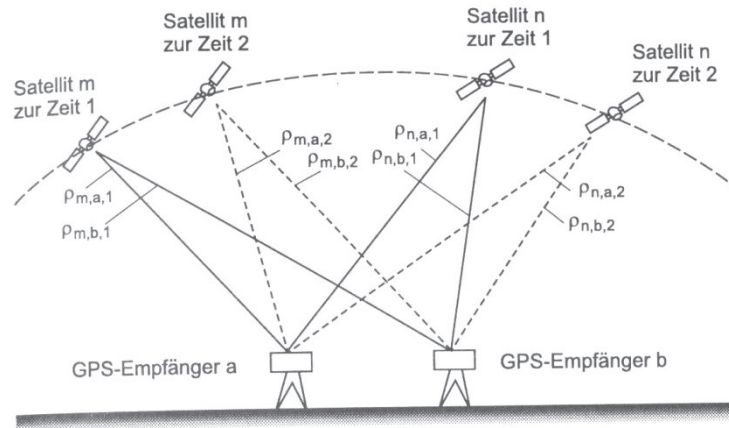


Abbildung 6: Bestimmung der Trägerphasendifferenz mit zwei Empfängern (MANSFELD, 1998, S. 227)

Im Ergebnis können hochgenaue dreidimensionale Basislinienvektoren gewonnen werden. Um die Absolutkoordinaten des Nutzers zu bestimmen, werden diese mit den bekannten Absolutkoordinaten der Referenz addiert. Dies kann durch die Übertragung der Original-Beobachtungsdaten der Referenz an den Rover oder durch die Übertragung von Beobachtungskorrekturen geschehen. Die Messungen können *statisch* oder *kinematisch* erfolgen (BAUER, 2011, S. 206 f.).

2.4.1 Statische Beobachtungsverfahren

Um Genauigkeiten der Koordinaten im Bereich von unter einem Zentimeter zu erzielen, kommen statische Beobachtungsverfahren zur Anwendung. Diese werden als statisch bezeichnet, weil sich die genutzten Empfänger für den Zeitraum der Messung in Ruhe befinden und nach deren Abschluss ausgeschaltet werden. Die Auswertung erfolgt gewöhnlich im Nachhinein, wofür der Begriff des *Postprocessings* steht. Dabei sind verschiedene Beobachtungsanordnungen gebräuchlich:

- die *Basislinienbeobachtung*
- die Stern- bzw. Doppelsternbeobachtung
- sowie die Mehrstationsbeobachtung.

Das Prinzip der im praktischen Teil dieser Arbeit ausgeführten Messungen basiert auf der Basislinienbeobachtung (auch Basislinienbestimmung). Dabei werden wie zuvor erläutert die 3D-Koordinatendifferenzen der Empfänger(-standpunkte) bestimmt und anschließend auf die bekannten Koordinaten der Referenz addiert, um die Koordinaten des Neupunktes zu erhalten. Da sich mit zunehmendem Abstand die

bereits erwähnten Fehlereinflüsse immer schlechter verringern bzw. nicht mehr eliminieren lassen darf in der Praxis die Länge der Basislinie nicht zu groß gewählt werden. Dies galt jedoch nicht für den Fall vorliegender Arbeit, da hier die Basislänge unter zehn Metern und somit weit unter der im Kilometerbereich liegenden Grenze lag. Auch die Messdauer ist von sehr großer Bedeutung. Um eine sichere Lösung für die Phasenmehrdeutigkeiten zu gewährleisten, empfiehlt BAUER (2011, S. 339 f.), Beobachtungszeiten von unter 15 - 20 Minuten zu vermeiden.

2.4.2 Kinematische Beobachtungsverfahren

2.4.2.1 Mit eigener Referenz

Bei kinematischen Beobachtungsverfahren befindet sich mindestens einer der verwendeten Empfänger in Bewegung. Dabei ist besonders bezüglich der *Monitoringsysteme* als Vorteil hervorzuheben, dass die Auswertung nicht zwangsläufig im Postprocessing geschehen muss, sondern auch in Echtzeit (real time) bewältigt werden kann. Sofern der Abstand des Rovers zur Referenzstation weniger als 10 km beträgt, können Genauigkeiten von 1 bis 2 cm erreicht werden. Werden mehrere Punkte aufgenommen, geschieht dies als räumliches polares Anhängen. Auf den zu vermessenden Punkten sollten die Satellitensignale ungestört empfangbar sein. Die Einflüsse durch *Mehrwegeeffekte* (s. Abschnitt 2.4.3) können erst nach Messzeiten von zehn Minuten oder mehr herausgemittelt werden. Zur schnellen und zuverlässigen Auflösung von Mehrdeutigkeiten wird außerdem eine Mindestanzahl von sechs zur Verfügung stehenden Satelliten empfohlen.

Diese Verfahren lassen sich weiterhin folgendermaßen differenzieren. Bei kontinuierlich kinematischen Beobachtungen wird die Nutzerposition permanent beobachtet, d. h. die Bahn der Empfängerposition eingemessen. Es liegen Beobachtungen einer einzigen *Epoche* vor. Dahingegen wird bei dem *Stop-and-Go*-Verfahren der Rover von einem Punkt zum Nächsten transportiert, auf welchem er für mehrere Messepochen verbleibt.

Als Voraussetzungen für diese RTK-Vermessungen gilt, dass die Mehrdeutigkeiten zu Beginn der Messung bestimmt (Initialisierung) und durch Datenübertragung über Funk zwischen Referenz und Rover während der Messung bestehen bleiben. RTK-Vermessungen sind Basislinienverfahren (BAUER, 2011, S. 339 ff.).

Die mit Leica GNSS Spider durchgeführte Überwachungsmessung wurde unter der Einstellung „Real Time Product“ durchgeführt. Die Positionen des Rovers bzw. des zu überwachenden Punktes wurde in ausgewählten Intervallen in Echtzeit als Basislinie zum Referenzempfänger berechnet, gespeichert und entsprechend ausgegeben. So lässt sich dieses Zusammenwirken für die gewählte Vorgehensweise gut mit Hilfe des Begriffs RT(K)-Monitoring oder noch besser Echtzeit-Monitoring bezeichnen. Obwohl es sich beim Rover um einen fest aufgebauten Punkt handelt, konnte dieser aufgrund

seiner Funktion als zu überwachender Punkt wie ein sich in Bewegung befindender Empfänger betrachtet werden.

2.4.2.2 Im Referenzstationsnetz

Die Nutzung einer (eigenen) Referenzstation hat immer den Nachteil, dass dadurch das Messgebiet räumlich eingeschränkt wird. Nachteilig ist auch, dass stets ein zweiter Empfänger in den Außendienst mitgenommen, aufgebaut und beaufsichtigt werden muss. Deshalb haben sich besonders in den Industrieländern private und auch staatliche *Netz-RTK*-Dienste etabliert. Ihre Anzahl steigt ständig. Diese haben ganze Gebiete flächendeckend mit ihren Permanent-Referenzstationen (Abstand ca. 50 km) vermascht. Zwischen den Referenzstationen werden kontinuierlich Rohdaten ausgetauscht und daraus Korrekturdaten berechnet, welche den Nutzern in entsprechenden Datenformaten zur Verfügung gestellt werden. Für die Korrekturdatenbereitstellung existieren drei verschiedene Konzepte.

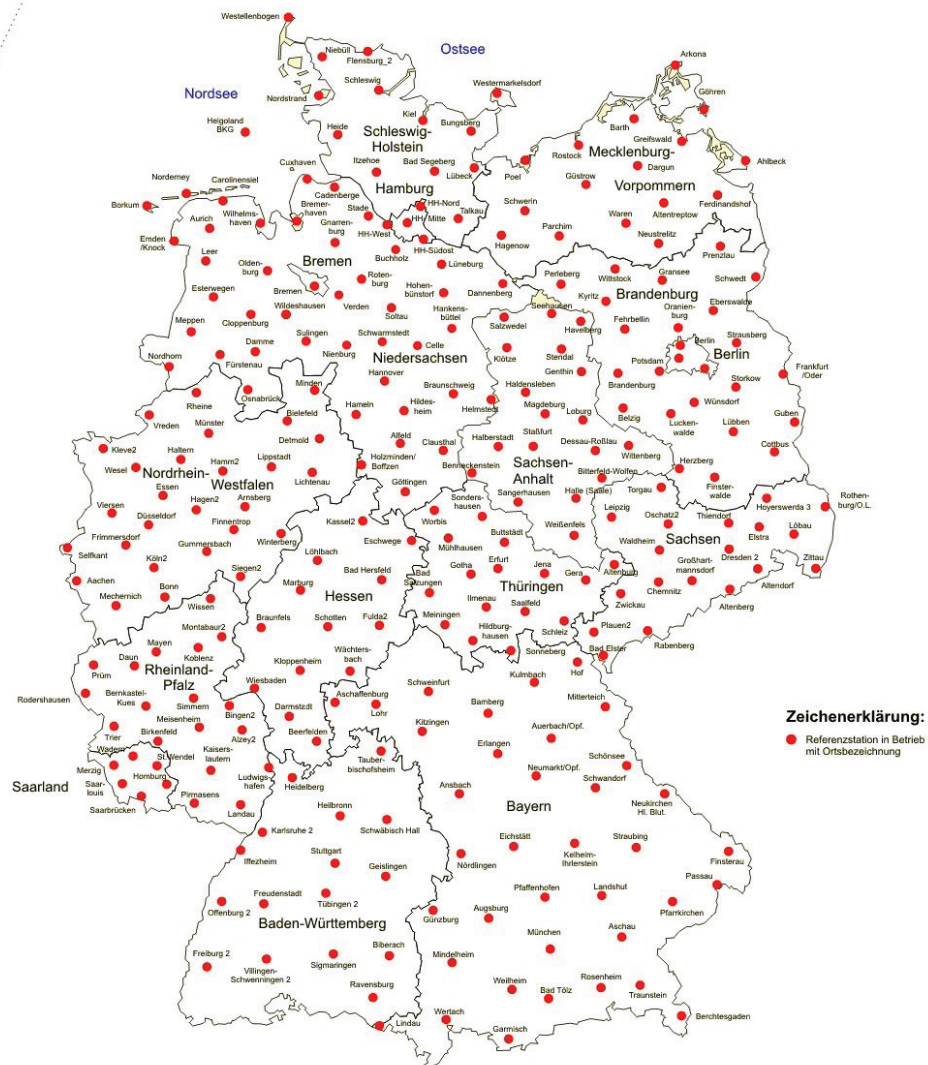
Bei dem Konzept der *Flächenkorrekturparameter* (FKP) werden die Näherungskordinaten der Nutzerstation an die Rechenzentrale des RTK-Netzes übermittelt, die nächstliegende Referenzstation wird zur Masterstation. Anschließend übermittelt sie dem Nutzer die Flächenkorrekturparameter, mit denen die eigenen Messdaten korrigiert werden können.

Mit dem Prinzip der *virtuellen Referenzstation* (VRS) werden aus Korrekturdaten einer Referenzstation Näherungskordinaten für die Position des Nutzers errechnet. Diese Position gilt als Virtuelle Referenzstation. Für sie werden anschließend die zu erwartenden Korrekturdaten berechnet.

Nach dem *Master-Auxiliary-Concept* (MAC) wird zunächst die dem Nutzer nächstgelegene Referenzstation zur Masterstation ernannt. Umliegende Stationen werden zu sogenannten Auxiliary-Stationen. Aus den Näherungskordinaten des Nutzers erhält dieser Rohdaten von der Masterstation. Die Auxiliary-Stationen übermitteln dann Koordinaten- und Korrekturdifferenzen, welche sich auf die Masterstation beziehen. Mit geeigneten Algorithmen kann der Rover schließlich seine genaue Position berechnen (BAUER, 2011, S. 212 ff.).

Anbieter von Referenzdiensten haben sich mittlerweile weltweit auf unterschiedlichsten Ebenen etabliert. Als globaler Dienst ist der *International GPS Service* (IGS) zu nennen, der mit seinen Produkten unter anderem zur Realisierung des ITRF beiträgt. Anbieter gibt es ebenso für alle weiteren Ebenen, z. B. *EUREF* für die kontinentale Ebene.

Für Deutschland lassen sich die privaten Anbieter Trimble VRS Now und ascos erwähnen (WILLGALIS, 2005, S. 99 f.). Von den Vermessungsverwaltungen wird *SAPOS* betrieben. Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung nutzt mehr als 270 eigene Referenzstationen und 30 weitere aus Nachbarländern.



Stand: September 2012

Abbildung 7: SAPOS-Referenzstationen (ADV, 2013)

Die Daten werden in durch die Vermessungsämter betriebenen Rechenzentralen erhoben und den Nutzern in Form von FKP-, VRS- oder MAC-Lösungen bereitgestellt. Angeboten wird der Dienst in verschiedenen Genauigkeitsstufen zu unterschiedlichen Tarifen. Es vereinigt die Dienste Echtzeit-Positionierungs-Service (EPS), Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service mit Vernetzung (HEPS), Geodätisch Präziser Positionierungs-Service (GPPS) und Geodätischer Hochpräziser Positionierungs-Service (GHPS). Für die RTK-Messung wird jedoch nur HEPS genutzt und über Mobilfunk oder mobiles Internet an den Rover übertragen. Angegeben wird die Echtzeit-Positionierungsgenauigkeit mit 1-2 Zentimetern in der Lage und 2-3 Zentimetern in der ellipsoidischen Höhe.

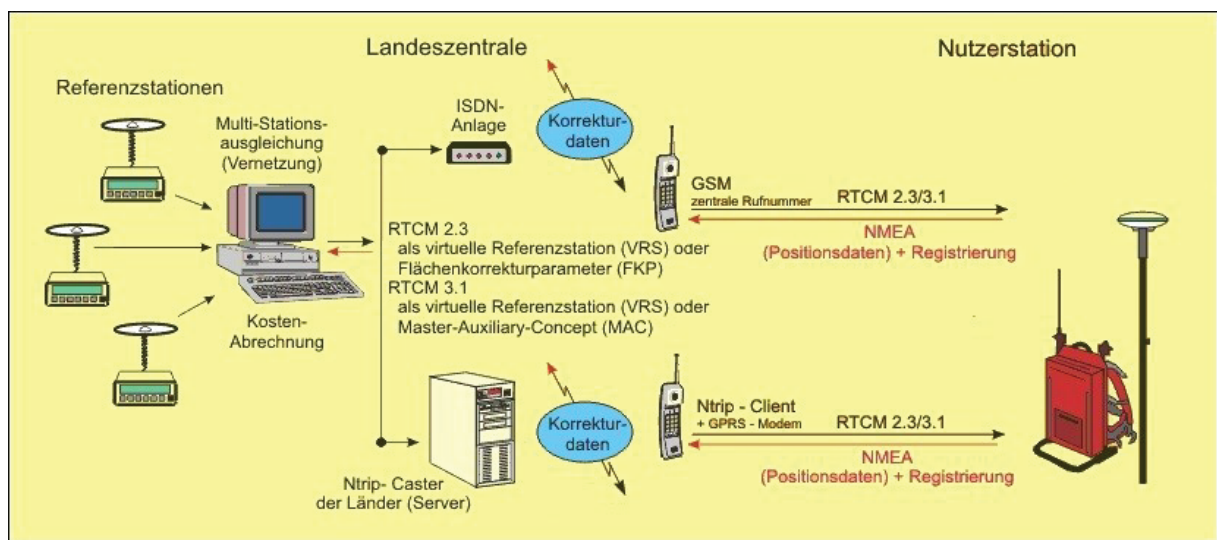


Abbildung 8: Funktionsschema SAPOS HEPS (ADV, 2013)

Als Korrekturdatenformat dient der international eingeführte Standard *RTCM SC-104*; die Daten werden im Sekundentakt übertragen. Pro genutzter Minute fallen Kosten von 0,10 € an (ADV, 2013).

Mit Leica GNSS Spider lassen sich so auch in Kombination mit Leica SmartNet Master-Auxiliary-Korrekturen innerhalb eigener RTK-Netze bzw. von eigenen Referenzempfängern berechnen und an die Nutzer innerhalb des Netzwerks übermitteln.

2.4.2.3 Datenübertragung

Die Kommunikation ist eine wichtige Komponente des Referenzstationssegments. Die Rohdaten bzw. Korrekturdaten müssen zeitnah, flächendeckend und zuverlässig von den Referenzstationen an die Rechenzentrale und an den Nutzer übertragen werden. Die Übertragungsart ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, so auch von der Reichweite, die der Referenzdienstbetreiber abzudecken beabsichtigt. Nachfolgende Tabelle soll eine Übersicht über die gängigen Datenübertragungslösungen geben.

Tabelle 3: Kommunikationslösungen zur Echtzeit-Korrekturdatenübertragung an mobile Nutzer (WILLGALIS, 2005, S. 83)

Medium	Reichweite [km]	Bandbreite [bps]	Nutzer
LW	600	300	unbegrenzt
UKW	50	100	unbegrenzt
DAB/DVB-T	50	8000	unbegrenzt
UHF-Funk (70 cm)	Wenige km	9600	unbegrenzt
VHF-Funk (2 m)	40	2400	unbegrenzt
Mobilfunk	Global	9600	1 pro Kanal
Internet	Global	>9600	unbegrenzt

2.4.2.4 Datenformate

Der herstellerunabhängige Austausch von Roh-, Korrekturdaten und Ergebnissen globaler Navigationssysteme erfordert einheitlich definierte und allgemein akzeptierte Datenformate. Dafür haben sich das *RINEX*-Format (Speicherung und Austausch von Rohdaten), das *RTCM*-Format (Echtzeitübertragung der Beobachtungen) und das *NMEA*-Format (Übertragung von Positionsinformationen) durchgesetzt.

Das 1989 eingeführte Empfänger Independent Exchange Format (RINEX) dient der Speicherung und dem Austausch von Beobachtungen (observation data file) und Ephemeriden (navigation data file) von GLONASS und GPS im ASCII-Format. Die RINEX-Datei besteht aus einem Kopfteil (Header) und den eigentlichen Daten. Dazu können der Messzeitpunkt, die Code-Pseudostrecken, die Trägerphasen in Anzahl der Wellenlängen, die DOPPLER-Frequenzverschiebung und die Signal-Rausch-Verhältniswerte gehören. Der RINEX-Standard wurde bis zur aktuellen Version über längere Zeit hinweg weiter verändert. Die aktuelle Version ist RINEX 3.0. Da diese Dateien aufgrund der ASCII-Codierung relativ viel Speicherplatz benötigen, wurden öffentlich anerkannte Kompressionsmethoden entwickelt. Dazu gehört die HATANAKA-Kompression, mit der die Datei nach Verwendung eines Packprogramms nur noch 10 % ihrer ursprünglichen Speichergröße aufweist. Diese Einstellungen sind auch in die Spider-Software integriert.

Der erste RTCM-Standard wurde 1985 durch die Radio Technical Commission for Maritime Services zur Echtzeitübertragung von Beobachtungen satellitengestützter Navigationssystem veröffentlicht. Aufbau und Struktur ähneln stark den GPS-Navigationsnachrichten. Dadurch sollte die Kompatibilität zu GPS-Empfängern gewährleistet werden. Es definiert eine Vielzahl von Nachrichtentypen. Einige davon dienen den GNSS als Übertragungsformate der Korrekturdaten.

Wie RTCM war auch das NMEA-Format (National Marine Electronics Association) ursprünglich für marine Anwendungen konzipiert worden. Und auch in diesem Fall hat das Format schnell darüber hinaus gehende Verwendungen gefunden. Moderne GNSS-Empfänger sind in der Lage ihre Positionierungsergebnisse gemäß diesem

Standard auszugeben. Es gibt verschiedene NMEA-Datensätze, bei denen die Ergebnisse in unterschiedlichen Formaten vorliegen können (BAUER, 2011, S. 421 ff.).

Leica GNSS Spider bietet ebenfalls die Option die Echtzeitergebnisse in sogenannten NMEA-Streams auszugeben, dabei werden die NMEA-Formate GGA, GGQ, LLQ, sowie ein Leica-eigenes, dem NMEA ähnlichem Format angeboten.

Für den Korrekturdatenaustausch zwischen kompatiblen Geräten hat Leica ein weiteres eigenes Format entwickelt, welches neben RTCM angeboten wird. Dieses Binärformat heißt LB2 und kann in Verbindung mit einem geeigneten Empfänger, Mobiltelefon oder Modem, verwendet werden, um Daten in Echtzeit zu übertragen. Dieses Format ist jedoch geschützt und nicht für die allgemeine Öffentlichkeit verfügbar.

2.4.3 Fehlereinflüsse

Die Fehlereinflüsse bei der hochpräzisen GNSS-Positionsbestimmung lassen sich in *entfernungsabhängige* und *stationsabhängige* Fehler unterteilen.

Entfernungsabhängige Fehler entstehen durch atmosphärische Ausbreitungsverzögerungen und die Bahnfehler der Satelliten. Ein Ansatz zur Verringerung dieser Einflüsse in Echtzeit ist die Vernetzung von Referenzstationen. Fehler, die nicht entfernungsabhängig, sondern auf jeder Station unterschiedlich (stationsabhängig) wirken, sind unter anderem die Mehrwegeeffekte (Multipath), die *Antennenphasenzentrumsvariationen* und das sogenannte Messrauschen.

Während die stationsabhängigen Fehler bei allen Fällen der relativen Positionierung beachtet werden müssen, sind die entfernungsabhängigen Fehler nur bei Empfängerabständen von einigen Kilometern oder mehr von Bedeutung (MÖSER et al., 2000).

2.4.3.1 Entfernungsabhängige Fehlereinflüsse

Die *Ionosphäre* befindet sich in einer Höhe von etwa 80 bis 1000 Kilometer über der Erdoberfläche. In diesem Bereich unterliegen die vorhandenen Gasmoleküle der Sonneneinstrahlung und werden durch sie ionisiert. Mit größerer Höhe nimmt auch die Elektronendichte und somit die Dichte der Luftschichten zu. Da dieser Fehler, die ionosphärische Refraktion, von der Sonneneinstrahlung abhängt, gibt es tages- und jahreszeitliche Schwankungen, die beachtet werden müssen.

Beim Durchqueren der Satellitensignale dieses Bereichs mit variablem Brechungsindex, weicht die Signalausbreitungsgeschwindigkeit von der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ab. Da das Signal aber auf unterschiedliche Wellenlängen ausgesendet wird, werden auch die Frequenzen (L1, L2) unterschiedlich gebrochen. Die ionosphärische Refraktion ist also frequenzabhängig.

Durch Zweifrequenz-Messungen oder die Verwendung physikalischer Korrekturmodelle lassen sich die Einflüsse der Ionosphäre jedoch weitestgehend eliminieren.

Bis etwa 10 km über der Erdoberfläche erstreckt sich die Troposphäre. Der Grund für die troposphärische Refraktion liegt bei den enthaltenen Gasmolekülen und dem vorhandenen Wasserdampfgehalt. Mit zunehmender Höhe nimmt die Dichte der Luftschichten und damit, die Refraktion stetig ab. Dies führt zur Brechung bzw. Dämpfung des GNSS-Signals, was ebenfalls eine Laufzeitverzögerung hervorruft. Da für die Mikrowellen diese Refraktion so gut wie frequenzunabhängig ist, werden andere Ansätze zur Korrektur benötigt. Es ist möglich, Standardatmosphärenparameter und -modelle zu nutzen. Bei der relativen Positionsbestimmung wird der Einfluss, besonders bei kurzen Basislinien, durch die Differenzbildung stark verringert. Zusätzlich können in der Auswertung Restfehler durch die Schätzung troposphärischer Zenitkorrekturen erfasst werden (BAUER, 2011, S. 101 ff.).

Bei der relativen Positionierung kommt den Fehlern der Satellitenbahnen (*Orbitfehler*) ebenfalls Bedeutung zu. Die Bahndaten werden als Teil der Satellitennachricht empfangen (broadcast ephemeris) und sind solchermaßen Bestandteil der Auswertung. Die Satelliten bewegen sich auf präzisen Bahnen um die Erde, unterliegen jedoch den Gravitationskräften der Sonne und des Mondes, wodurch geringe Schwankungen entstehen.

Die Orbitfehler liegen für gewöhnlich im Bereich von drei Metern. Ein Fehler von zehn Metern verursacht 0,4 ppm als Koordinatenfehler. Dadurch lässt sich der Einfluss auf die Koordinatenfehler bis zu einigen Kilometern Basislinienlänge im Millimeterbereich einschätzen. Bei statischen Messungen verringert sich dieser mit Fortschritt der Messdauer noch weiter. Seit einigen Jahren werden auch präzise Ephemeriden vom International GPS Service bereitgestellt. Diese lassen sich in das Postprocessing miteinbeziehen und verringern den Einfluss auf weit unter einen Millimeter (MÖSER et al., 2000, S. 296).

Da in Echtzeit jedoch lediglich die Broadcast-Ephemeriden zur Verfügung standen, wurden auch nur diese in den praktischen Messungen dieser Arbeit verwendet.

2.4.3.2 Stationsabhängige Fehlereinflüsse

Das geometrische Phasenzentrum von GNSS-Antennen stimmt nicht mit dem elektromagnetischen Zentrum überein. Die Differenz bei geodätischen Empfängern liegt im Millimeter- bis Zentimeterbereich. Außerdem ändert sich dieses auch geringfügig in Abhängigkeit von der Richtung, aus welcher die Signale eintreffen. Es gibt verschiedene Verfahren zur Antennenkalibrierung. Durch die Verwendung gleicher Empfänger und einer identischen Ausrichtung lässt sich diese Fehlerart ebenso beseitigen. Letzteres ist jedoch nur bei kürzeren Basislinien der Fall, da dann auch die Richtung zu den Satelliten annähernd gleich ist.

Mehrwegeausbreitungen (Multipath) entstehen durch Reflexionen des Signals an vertikalen (z. B. Wänden) oder horizontalen (z. B. Boden) Flächen. Im Empfänger treffen dann sowohl die direkte als auch eine oder mehrere reflektierte Wellen ein. Dadurch kommt es zu einer Überlagerung des Signals (Frequenzverschiebung) und somit zu einem Streckenfehler, der in der Praxis bei zwei bis drei Zentimetern liegen kann.

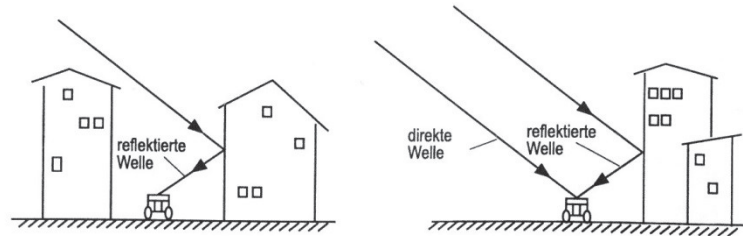


Abbildung 9: Empfang bei von Wellen bei Mehrwegeeffekten (MANSFELD, 1998, S. 60)

Diesen Effekten kann durch eine sorgfältige Standortwahl (geringe Abschattungen, Vermeidung reflektierender Flächen), längere Beobachtungszeiten sowie die Verwendung sogenannter Choke-Ring-Antennen (mit einer Bodenplatte unter der Mindestelevation) entgegengewirkt werden (MANSFELD, 1998, S. 183 f.). Letztere wurden in dieser Arbeit nicht genutzt.

Auftretende Sichthindernisse am Horizont der Antenne können den direkten Empfang des Satellitensignals behindern. An der Kante eines abschattenden Objektes kommt es oft zu einer Signalbeugung (*Diffraction*). Der Empfänger registriert ein indirektes Signal, welches eine längere Laufzeit als das direkte aufweist. Dieser Fehler ist nicht frequenzabhängig und es findet keine Signalüberlagerung statt. Der Fehler entspricht dem tatsächlichen Weg des gebeugten Signales. Die besondere Eigenschaft des indirekten Signals ist die stark verringerte Signalstärke. Dieser Messfehler kann bis zu zwanzig Zentimeter ausmachen.

Anhand der Signalschwäche (niedrige Amplituden) lassen sich die Signalbeugungen identifizieren. Häufig wird dabei das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR – Signal-to-Noise-Ratio) betrachtet. Betreffenden Phasenbeobachtungen müssen in diesem Falle in der Auswertung verringerte Gewichtungen zugeordnet werden. Die meisten Auswerteprogramme ignorieren den Faktor Signalstärke. Dies hat zur Folge, dass bei kinematischen Messungen Diffractionseinflüsse nicht beseitigt werden können (BAUER, 2011, S. 116 f.).

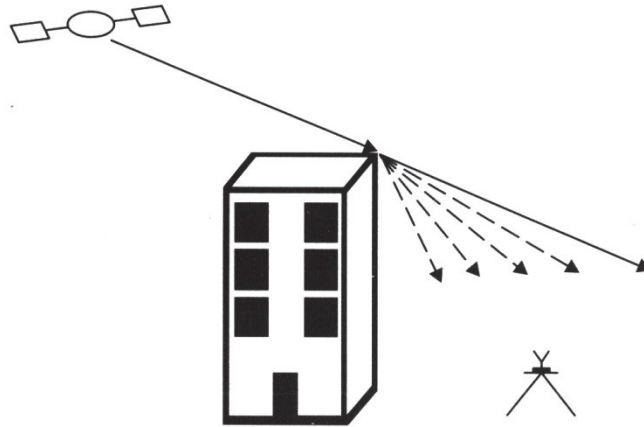


Abbildung 10: Signalbeugung (BAUER, 2011, S. 116)

3 Geodätische Überwachungsmessungen

Geodätische Überwachungsmessungen sind ein wichtiger Aufgabenbereich der Ingenieurgeodäsie. Sie beinhalten die mess- und auswertetechnische Erfassung geometrischer Objektveränderungen.

Auch aus diesem Grunde beschäftigt sich vorliegende Arbeit mit diesem Thema unter Verwendung von GNSS-Empfängern in Kombination mit der Vernetzungs-, Auswerte- und Bedienungssoftware von Leica GNSS Spider.

Während in der Vergangenheit für die Planung, Ausführung, Auswertung und Dokumentation der systematischen Erfassung geometrischer Objektveränderungen Begriffe wie geodätische Überwachung, Inspektions- oder auch Kontroll(ver)messung weitestgehend gleichbedeutend benutzt wurden, hat sich seit einigen Jahren nicht zuletzt unter dem Einfluss des Englischen immer mehr der Begriff des Monitorings, genauer Geomonitoring oder geodätisches Monitoring, durchgesetzt (HEUNECKE et al., 2013, S. 1).

Dass das geodätische Monitoring von künstlichen und natürlichen Objekten immer stärker an Bedeutung zunimmt, hat wie bereits in der Einleitung angedeutet, vielerlei Gründe. Die breite Öffentlichkeit allerdings wurde vor allem durch Unglücksfälle wie den Einsturz des Kölner Stadtarchives oder das Versagen der Dachkonstruktion einer Eishalle in Bad Reichenhall, beides im Jahre 2006, oder jüngst den Einsturz eines Einkaufszentrums in Riga für das Monitoring sensibilisiert.

In einem Artikel von EICHHORN (2012) wird eine kurze Definition zum Begriff des Monitorings und seinen Funktionen gegeben. Danach bedeutet Monitoring

- „die unmittelbare systematische Erfassung/Beobachtung/Überwachung eines Prozesses,

- u. a. mittels technischer Hilfsmittel,
- mit einer wiederholten Durchführung,
- und dem Ziehen von Schlussfolgerungen aus dem Vergleich der Ergebnisse.“

Zu den Schlüsselfunktionen des Monitorings gehört das „steuernde Eingreifen, falls der Prozess nicht den gewünschten Verlauf nimmt bzw. bestimmte Schwellenwerte unter- oder überschritten sind“ (EICHHORN, 2012).

Mit Hilfe der von HEUNECKE (2012) gegebenen Definition lassen sich diese Funktionen noch genauer ausführen. Neben dem Bestimmen geometrischer Veränderungen kann das Monitoring dazu dienen, die „Funktions- und Standsicherheit des Messobjektes“ nachzuweisen und einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Es dient der „rechtzeitigen Erfassung von Veränderungen, um Gefährdungen für das Messobjekt und seine Umgebung zu vermeiden“ oder zu mindern. Es kann die Schadensdokumentation gewährleisten und dazu beitragen, Ursachen von Schäden aufzuklären. Unschätzbar ist vor allem sein Beitrag zur Prognose anzunehmenden Verhaltens in der näheren Zukunft und des Verhaltens unter bestimmten Bedingungen, der Überprüfung von Konstruktions- und Materialeigenschaften sowie zum Erkenntnisgewinn bei vergleichbaren Messobjekten.

Diese nachzuweisenden Veränderungen werden durch physikalische, meteorologische, statische oder hydrologische Einflüsse hervorgerufen und können, während der Bauphase, aber auch noch (lange) nach deren Abschluss auftreten, und in

- Verformungen, Verschiebungen, Rutschungen,
- Setzungen, Senkungen, Hebungen
- Neigungen, Schiefstellungen, Kippungen oder Durchbiegungen resultieren (MÖSER et al., 2000, S. 23 f.).

Erfassen lassen sich die geometrischen Veränderungen durch den Vergleich der Koordinaten verschiedener Epochen. Dieser klassische Ansatz findet zwar seit den Anfängen von Überwachungsmessungen Verwendung, und ist auch bis heute gebräuchlich. Zugleich jedoch haben technische Weiterentwicklungen, besonders im Bereich automatisierter Messsysteme und moderner Sensoren mit hohen Frequenzen es ermöglicht, vom epochenweisen zum zeitkontinuierlichen Erfassen von Veränderungen überzugehen (EICHHORN, 2012). Dieses Prinzip wird auch bei den Echtzeitmessungen mit Leica Spider verwendet, die im Rahmen dieser Arbeit genauer untersucht werden.

Bei Echtzeitmessungen können im gewählten Zeitintervall neue Positionsbestimmungen durchgeführt und die Ergebnisse in einer dazugehörigen Datei angefügt („Stream(-datei)“) oder in ein Analyseprogramm eingespeist werden.

3.1 Geodätische Messverfahren

Die Wahl der Messtechnik hängt natürlich grundsätzlich von der jeweiligen Aufgabenstellung und den damit verbundenen Genauigkeitsanforderungen ab. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt unterliegt die Auswahl jedoch oft nicht mehr technischen oder methodischen, sondern eher ökonomischen Einschränkungen.

Prinzipiell lassen sich mittlerweile fast alle Messverfahren mehr oder weniger automatisieren. Für die Beobachtungen statischer bzw. quasistatischer Objekte stehen verschiedene terrestrische und globale Messsysteme zur Verfügung. Die Angaben von Höhen und Koordinaten hängen dabei von der Wahl des Bezugssystems und der Festsetzung des Referenzrahmens ab (HEUNECKE et al., 2013, S. 33 f.).

Einen Überblick über ausgewählte geodätische Messverfahren und die damit erreichbaren Genauigkeiten bietet folgende von HEUNECKE (2013, S. 34) präsentierte Tabelle.

Tabelle 4: Übersicht geodätischer Messverfahren und pauschale Messunsicherheiten (HEUNECKE et al., 2013)

Geodätisches Messverfahren	Messunsicherheit	Anmerkungen
Elektrooptische Distanzmessung	1 mm + 1 ppm	bis zu Distanzen von 2 km
Horizontalrichtungsmessung	0,3 mgon (\cong 1 mm auf 200 m)	
Zenitwinkelmessung	1 mgon (\cong 3 mm auf 200 m)	Abhängig von Refraktionsinflüssen
Satellitengestützte Positionsbestimmung	2 mm + 0,5 ppm	PDGNSS bis ca. 5 km Punktabstand
Feinnivellement	0,5 mm/km	als Messverfahren nicht automatisierbar
Hydrostatisches Nivellement	0,1 mm	Messbereich bis ca. 10 m
Alignement	0,5 - 1 mm	Erfassung von horizontalen Biegelinien
Lotungsmessung	0,5 - 1 mm	Erfassung von vertikalen Biegelinien
Neigungsmessung	0,3 - 0,5 mgon	oft auch als Beschleunigungsmesser einsetzbar
Inklinometer	\leq 0,2 mm	Erfassung Biegelinien in Form von Tangentenpolygonen
Extensometermessung	0,1 - 1 mm	

3.2 Monitoring mit GNSS

Die Vorteile des Einsatzes von GNSS (mit Leica Spider) bei Überwachungsmessungen sollen im Weiteren beschrieben werden.

Ein Qualitätskriterium stellt die Art des Messbetriebs dar. Dieser kann bedient und unbedient (automatisiert) erfolgen.

Wird ein entsprechendes Auswerte- bzw. Analyseprogramm, wie zum Beispiel Leica SpiderQC in Kombination mit der GNSS Spider Software genutzt, ist lediglich der Aufbau und die Konfiguration der Messsensoren notwendig. Die Beobachtungen können anschließend vollautomatisch durchgeführt werden. Auch die Datenspeicherung bzw. Alarmierung (z. B. per Email oder SMS) bei dem Überschreiten definierter Schwellenwerte kann automatisch erfolgen. Durch die Wahl geeigneter Messintervalle kann zugleich eine gewisse Redundanz hinsichtlich der Beobachtungen erreicht werden. Mit Leica GNSS Spider lassen sich Intervalle von 0,05 s oder größer definieren. Dabei kann entweder im Allgemeinen auf die programmabhängige Datenanalyse vertraut werden. Bei Unsicherheiten bezüglich der Datenbeschaffenheit bzw. -vollständigkeit wäre allerdings eine manuelle Kontrolle der Daten durch den Nutzer erforderlich. Letzterer Fall stellt jedoch den Begriff des Echtzeitmonitorings in Frage.

Ein großer Vorteil im Gegensatz zum Tachymeter liegt auf jeden Fall darin, dass keine direkte Sichtverbindung zu den Messpunkten bestehen muss. Auch sind größere Punktabstände und noch größere in Kombination mit einem Positionierungsdienst, möglich. Hervorzuheben ist auch, dass sich die gängigen Empfänger durch eine höhere Robustheit gegenüber meteorologischen Einflüssen oder auch Vandalismus auszeichnen. Sie sind wartungsfreier und oft kostengünstiger als moderne motorisierte Totalstationen. Ebenso ist eine genauere Zeiterfassung mit diesen Empfängern möglich.

Beim 2013 im Londoner Stadtteil Southwark abgeschlossenen Bau von „The Shard“, dem mittlerweile zweithöchsten Gebäude Europas, kamen neben vier Inklinometern und einer Totalstation auch vier GMX902GG Sensoren und Leica GNSS Spider zum Einsatz. Aufgrund der vorliegenden urbanen Verhältnisse (hohe Abschattungen, Mehrwegeeffekt, Diffraktion) und dem damit verbunden teilweise mittelmäßigen GNSS-Empfang wurden weiterhin Korrekturdaten des Referenzdienstes Leica SmartNet bezogen. Damit ließ sich eine dreidimensionale Koordinatengenauigkeit von 25 mm erreichen (KEYNES, 2012).

Auf eine ähnliche Kombination wird beim Bau des Brenner Basis Tunnels in den Alpen zurückgegriffen. Hier geschieht dies vor allem, um eventuelle Setzungen feststellen zu können. Auch bei großen Brückenprojekten wie der Langzeitüberwachung der Yeongjong-Brücke in Südkorea kommt die RTK GNSS Technologie Leicas zum Einsatz.

4 Leica GNSS Spider

Nach der Beschreibung der Grundlagen und dem Entwurf eines Gesamtüberblicks zu den Globalen Satellitennavigationssystemen in den vorigen Teilen der Arbeit soll nun das im Zentrum der Arbeit stehende Leica GNSS Spider (von hier an auch kurz „Spider“) genauer beschrieben und analysiert werden. Einblicke in Funktion, Arbeitsweise und einzelne Module des Programms zu geben ist wichtig, um die Voraussetzungen für die durchgeführten und in dieser Arbeit im Anschluss dokumentierten Messungen deutlich zu machen. Das gilt umso mehr, da das Vorhaben nicht auf den ‚rein‘ experimentellen Teil beschränkt ist, sondern ausdrücklich unternommen wurde, um die erforderlichen Arbeitsschritte für Studierende aufzubereiten und solchermaßen die Bewertung der gewonnenen Daten einschließt.

4.1 Überblick und Arbeitsweise

GNSS Spider ist eine integrierte Softwarelösung zum zentralen Betrieb von GNSS-Referenzstationen und -Netzen von der Firma Leica Geosystems AG.

Vorausgesetzt, dass entsprechende Lizenzen vorhanden sind, lassen sich mit Spider folgende Aufgaben für einzelne GNSS-Stationen und Stationsnetzwerke bewältigen:

- Konfiguration und Steuerung lokaler (unbeaufsichtigter) GNSS-Empfänger,
- regelmäßige Downloads der Daten von angebundenen Empfängern,
- Aufzeichnen (Loggen) von Rohdaten(streams),
- Datenspeicherung und -distribution,
- Qualitätskontrolle der Daten,
- fortlaufende Positionsrechnungen in Echtzeit,
- kontinuierliche Netzwerkrechnungen in Echtzeit,
- Verwaltung und Bereitstellung von
 - RTK- und DGNS-Diensten für einzelne Empfänger und
 - Netzwerk-RTK-Diensten für Empfänger eines Gebietes,
- Verwaltung, Kontrolle und Loggen der Roverzugriffe in Echtzeit (LEICA GEOSYSTEMS AG, 2010).

Innerhalb von Leica GNSS Spider muss zu anfangs einer von zwei verschiedenen Servertypen für alle weiteren Arbeiten gewählt und konfiguriert werden:

- **Site Server:** ist ein selbständiges Modul, welches die direkte Kommunikation und Einstellungen der Empfangsanlagen (engl. „Site“) verarbeitet und bei der Aufzeichnung von Rohdaten und dem Erzeugen von Echtzeitpositionsdaten innerhalb eines Netzwerks berücksichtigt

- **Network Server:** verbindet Site Server, Cluster Server und RTK Proxy Server miteinander; benötigt für die Bereitstellung von Netzwerk-RTK-Korrekturdaten und die Verwaltung der Rovernutzer innerhalb des Netzwerks.

Innerhalb der gewählten programminternen Serverumgebung stehen wiederum mehrere Menüs in Form von Tabs (Reitern) zur Verfügung. Darunter befinden sich unter anderem „File Products“, „RT Products“, „RT Positioning“ sowie „PP Positioning“.

Dabei handelt es sich um die Bezeichnungen für die Klassen der erzeugbaren (Daten-) Produkte, je nach gewähltem Servertypen, Hard- und Softwareressourcen sowie freigeschalteten Funktionen (Lizenzen). Sie dienen dazu, die oben aufgeführten Aufgaben zu erfüllen.

- **File Product:** *Speicherung von GNSS Rohdaten im RINEX-Format.* Hier sind die GLONASS-, Observations- und Navigationsdatei enthalten. Außerdem können Messungen von meteorologischen Sensoren und Neigungsmessern sowie ein Spider-eigener „Quality control report“ ausgegeben werden. darüber hinaus lassen sich die Daten aller Empfänger auch im binären Leica-internen MDB-Format und das Ereignisprotokoll (Event log) von Spider speichern.
- **RT Product:** *Bereitstellen von Korrekturdaten* für RTK-Netze (MAC, VRS, FKP) und einzelne Empfänger in RTCM 2.x und 3.x, und Leica-Empfänger-eigenen Formaten, die sich zum Beispiel via Funk oder Internet an die Nutzer in Echtzeit (RT – „Real Time“) aussenden lassen.
- **RT Positioning:** *Berechnung und Bereitstellen von Empfängerkoordinaten in Echtzeit.* Die Positionen werden aus Basislinien zwischen einer Referenz und einem Rover bestimmt und in einer Datei kontinuierlich (mit ausgewählten Intervallen) als Zeile angehängen („Streamdatei“) und gespeichert (NMEA-Format). Diese kann (auch in Echtzeit) zu einem entsprechenden Monitoring-Programm (z. B. GeoMoS) zur Analyse weitergeleitet werden.
- **PP Positioning:** *Berechnung und Bereitstellen von Empfängerpositionen im Postprocessing.* Die Positionen werden unter Anwendung troposphärischer und ionosphärischer Korrekturmodelle aus Basislinien berechnet und im NMEA-Format gespeichert (LEICA GEOSYSTEMS AG, 2010).

Um diese Funktionen nutzen zu können, ist es nach Programminstallation und Serverkonfiguration erforderlich, die zu verwendenden Empfängertypen in Spider zu registrieren und mit dem Programm, z.B. über eine serielle Schnittstelle, zu verbinden. Diese durch Versuchsanordnungen erarbeiteten und überprüften Erkenntnisse zu den unbedingt erforderlichen Arbeitsschritte wurden in einer im

Anhang vorliegender Arbeit beigefügten Anleitung zusammengestellt und entsprechend veranschaulicht. In ihr sind folgende Schwerpunkte erfasst: Installation und Lizenzenmanagement, praktische Messanordnung und Konfiguration der Sensoren sowie Messdurchführung in Spider und Datenübernahme in MATLAB bzw. Leica SpiderQC.

Als Vorbereitung dieser Arbeit bedurfte es mehrerer Schritte organisatorischer Natur, u. a. dem Besorgen der Technik und Überblicken des zur Verfügung gestellten Equipments, dem Einholen von Schlüsseln, Raumberechtigungen sowie den Programmlizenzen, der Software und Koordinatenlisten.

Die erarbeiteten und unbedingt erforderlichen Schritte wurden beginnend mit Installation und Lizenzenmanagement, über die praktische Messanordnung und Konfiguration der Sensoren bis hin zur Messdurchführung in Spider und zur Datenübernahme in MATLAB bzw. Leica SpiderQC in einer entsprechenden Anleitung zusammengestellt und veranschaulicht (s. Anhang).

4.2 Durchführung einer Echtzeitüberwachungsmessung

Um die Arbeitsweise des Programms genauer kennen zu lernen und das System hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeiten unter den wirkenden Fehlereinflüssen (vgl. Abschnitt 2.4.3) zu überprüfen, wurden mehrere Messungen mit verschiedenen Ansätzen durchgeführt. Dabei wurden die Genauigkeiten anhand von Langzeitmessungen ermittelt, indem über einen längeren Zeitraum von mehreren Wochen hinweg mit unterschiedlichen Empfängern gemessen wurde. Nicht zuletzt sollte so versucht werden, ergebnisbezogene Periodizitäten (grafisch) zu ermitteln. Weiterhin wurden in separaten Durchgängen Verschiebungen in der Lage und Versetzungen in der Höhe simuliert und die Ergebnisse bewertet. Außerdem wurden Messungen zur Einflusseinschätzung, z. B. von Abschattungen durchgeführt.

4.2.1 Praktische Messanordnung

Zur Erfüllung dieser Aufgaben standen drei GNSS-Empfänger, die Software und die nötigen Verbindungskabel zur Verfügung. Als nächstes galt es, auch für eine Messung größeren zeitlichen Umfangs, geeignete Beobachtungspunkte zu finden. Dafür wurden die Messpfeiler auf dem Dach des Lehrgebäudes 2 der Hochschule Neubrandenburg ausgewählt.



Abbildung 11: Messpfeiler und anliegende Beobachtungsstation (Fotografie: M. Scholz)

Das sich ebenfalls auf dem Dach befindende Büro für geodätische Beobachtungen wurde als Standort für PC und GNSS-Empfänger ausgewählt. Ein Vorteil bestand darin, dass sich die Punkte auf den Messpfeilern durch eine geringe Abschattung auszeichneten. Lediglich der entfernt anliegende Dachaufbau mit o. g. Büro stellte eine mögliche Quelle für Abschattung, Mehrwegeeffekte bzw. Diffraktion dar. Der Bereich war größtenteils vom öffentlichen Betrieb in der Hochschule isoliert, sodass auch eine sichere unbeaufsichtigte Messung mit den Empfängern möglich und keinerlei Fremdeinwirkung oder gar Vandalismus zu befürchten waren. Die Betonmesspfeiler sind fest mit dem Gebäude verbunden und somit ist eine gute Stabilität der Beobachtungspunkte gewährleistet. Daneben befestigte Blitzableiter gaben Schutz vor Einschlägen; die Antennen- bzw. Stromkabel der Empfänger mussten aufgrund der Entfernung zum PC bzw. der Stromversorgung verlängert und die Verbindungen vor Feuchtigkeit geschützt werden. Dafür wurde mit verschiedenen (Schutzfolien, Industrieklebeband etc.) Materialien isoliert. Die Kabel wurden sicher und durch eine dafür vorgesehene Wandöffnung in die Beobachtungsstation verlegt.

Es war nicht möglich, die Antennen ohne weiteres auf die Bodenplatte der Messpfeiler zu schrauben, da der geringe Abstand zwischen Pfeilerplatte und Antennenunterkante das Anstecken der Antennen- bzw. Datenkabel verhinderte. So kamen speziell gefertigte Adapter zum Einsatz, die in einem Höhenoffset von 100 mm resultierten. Bei den späteren Messungen musste dies berücksichtigt werden.



Abbildung 12: GMX902GG-Empfänger mit Höhenadapter (Fotografie: M. Scholz)

Wie bereits erwähnt, wurden zwei GMX902GG-Zweifrequenzempfänger, sowie ein GMX901-Einfrequenzempfänger eingesetzt. Da sich ihr Aufbau leicht unterschied, folgt eine schematische Darstellung. Um Kurzschlüsse und Gerätedefekte unbedingt vermeiden zu können, ist immer genau auf die Typenbezeichnungen der Herstellerkabel zu achten. Im Schema wurden die Leica-Typennummern in Fettdruck hervorgehoben.

Die Empfänger wurden mit Hilfe von USB-Seriell-Adaptern über COM-Ports mit dem PC und Spider verbunden, weiterhin unterstützt das Programm auch Modem-/Funk-, NTRIP- und TCP/IP-Verbindungen.

Mit dem GMX902GG (Zweifrequenzempfänger) und der AS10-Antenne lassen sich Beobachtungen zu GPS- und GLONASS-Satelliten durchführen.

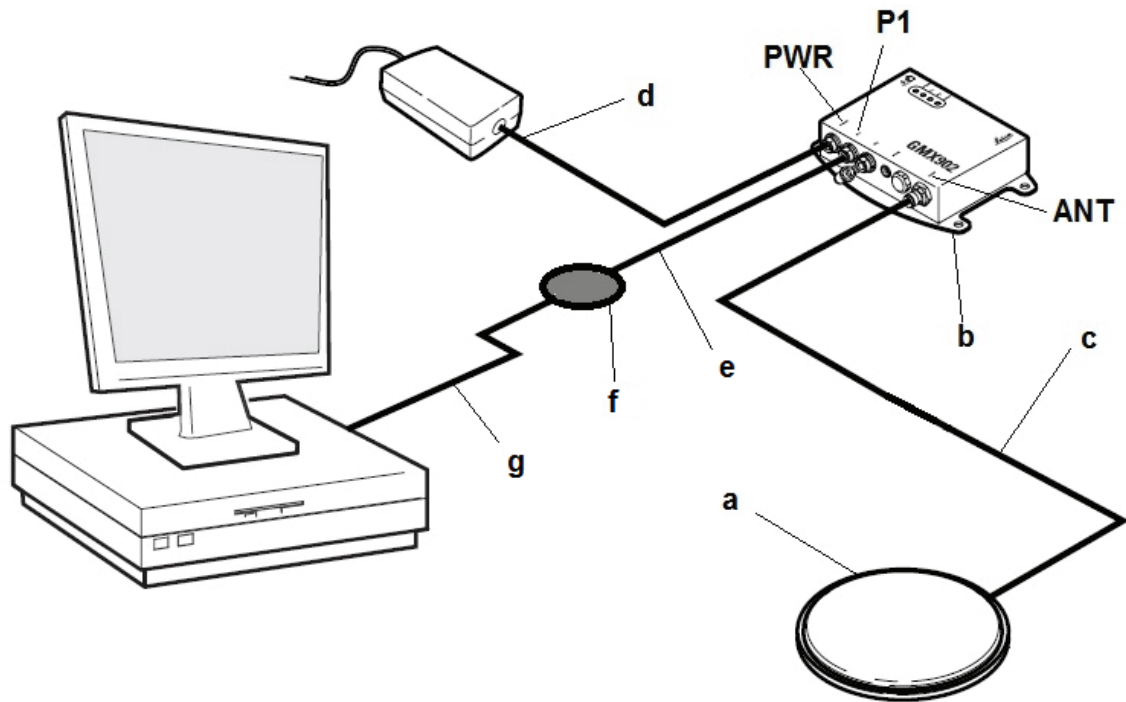


Abbildung 13: Aufbau GMX902GG (LEICA GEOSYSTEMS AG, 2007)

a – AS10

b – GMX902GG

c – Antennenkabel (z. B. 30 m) **632 390**

d – Stromversorgung **722 409**

e – Datenübertragungskabel 8-polig (m) und Seriell **741 947**

f – USB-Seriell-Adapter

g – USB-Verlängerung (bei Bedarf)

Die GMX901-Antenne besitzt bereits einen integrierten GNSS-(Einfrequenz-) Empfänger. Aus diesem Grund wird kein zusätzliches Antennenkabel benötigt. Mit ihr lassen sich lediglich GPS-Satelliten beobachten.

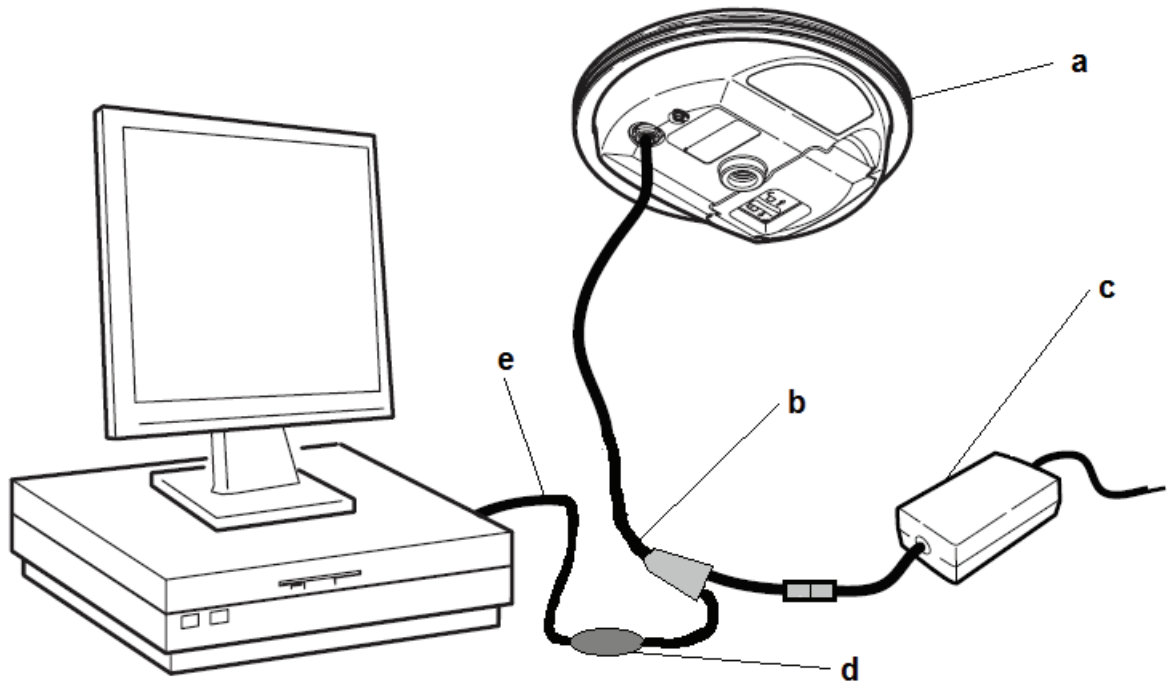


Abbildung 14: Aufbau GMX901 Aufbau GMX902GG (LEICA GEOSYSTEMS AG, 2007)

- a – GMX901
- b – Y-Antennenkabel mit Strom- und Seriellanschluss 743 389
- c – Stromversorgung 722 409
- d – USB-Seriell-Adapter
- e – USB-Verlängerung (bei Bedarf)

4.2.2 Konfiguration der Sensoren

Bevor die Arbeit mit Spider begonnen wird, sollte sichergestellt werden, dass die Treiber der USB-Seriell-Adapter installiert sind. Dazu reicht es nur die einzelnen Adapter nacheinander an die USB-Ports anzuschließen und auf die Reaktion im Gerätemanager zu warten.

Zu Beginn erschienen vermehrt Fehlermeldungen beim Verbindungsversuch mit Spider („*Could not connect*“ / „*Device not found*“). Auf der Suche nach den Gründen, konnte festgestellt werden, dass auf dem genutzten Windows 7 x64 System lediglich Adapter mit FTDI-Chipsatz (z. B. Digitus) erkannt wurden, während auf Windows XP x86 nur die Adapter des anderen großen Herstellers Prolific einwandfrei funktionierten und auch in Spider angenommen wurden. Ob dieser Treiberkonflikt an der Installationsreihenfolge der Adapter oder am verwendeten Betriebssystem lag,

konnte allerdings nicht zweifelsfrei geklärt werden. Generell ist der Einsatz chipsatzgleicher USB-Seriell-Adapter zu empfehlen.

Die Oberflächen des Spider-Programms inklusive die der Einstellungsfenster war größtenteils logisch aufgebaut und selbsterklärend. Bei Unklarheiten konnten fast immer die interne Programmhilfe, sowie der auf der Installations-DVD beigefügte User Guide zur Fragenbeantwortung beitragen.

Von Vorteil war die Kombination herstellergleicher (Leica) Programme und Geräte. So verfügt Spider bereits nach der Installation über die Antennendaten (z. B. Offsets des Phasenzentrums), so dass ein ansonsten erforderlicher Import von Daten entfällt.

Nach dem bereits erwähnten Konfigurieren des Servertyps ließen sich schließlich die Empfänger einstellen und anschließend verbinden. Neben den nötigen COM-Port-Einstellungen werden Bezeichnungen für die Station, (Näherungs-) Koordinaten, eventuelle Höhenoffsets, Antennentyp, Beobachtungsintervall und andere Informationen eingegeben.

Die Empfänger- bzw. Antennentypen konnten nach dem Anschließen über USB-Seriell mit Spider verbunden werden.

Danach konnten die Grundgrößen der Beobachtungen festgelegt werden. Für alle Messungen und alle Empfänger wurde eine Elevationsmaske von 10° verwendet. Die GMX902GG-Empfänger sammelten Beobachtungen zu GPS- und GLONASS-Satelliten auf L1 und L2. L5 und L2C werden zwar schon in Spider Version 4.0 unterstützt, nicht jedoch von den Empfängern. Mit dem GMX901 wurden lediglich L1-Signale von GPS ausgewertet.

Diese Schritte bilden das Grundgerüst für eine jede Messung mit GNSS Spider. Danach lassen sich mit den Funktionen „*File Products*“, „*RT Product*“, „*RT Positioning*“ sowie „*PP Positioning*“ die unterschiedlichsten Aufgaben lösen.

4.2.3 Durchführung

Für die Durchführungen der Messungen in Spider wurden RT Positioning Produkte angelegt und genutzt. Um die Positionen in Dateien im NMEA-Format ausgegeben zu bekommen, mussten dafür pro Produkt eine Referenz und ein Rover bestimmt werden.

Als Referenz wurde der östlichste Messpfeiler, welcher auch Benutzungsfestpunkt der Hierarchiestufe D ist, festgelegt (Punktnummer: 2445052650). Zu Genauigkeitszwecken wurde darauf bei allen Messungen eine AS10-Antenne mit GMX902GG Empfänger verwendet.

Der zweite GPS- und GLONASS-Empfänger wurde auf Punkt 3 (P3) aufgebaut und kam ebenso bei allen Durchführungen zum Einsatz.

Der mit der GMX901-Antenne besetzte Punkt 4 (P4) wurde bei der Langzeitmessung vergleichend betrachtet.

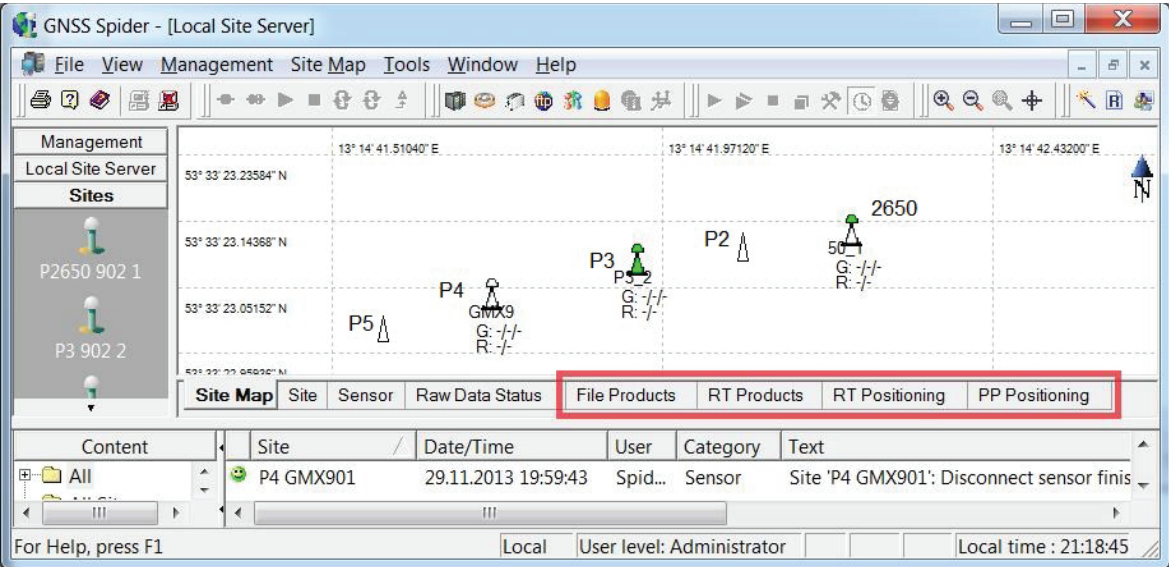


Abbildung 15: Besetzung der Messpfeiler (eigene Darstellung)

Das im Rahmen dieser Arbeit geschriebene MATLAB-Programm wurde entsprechend auf das Auslesen von Dateien im NMEA-LLQ Format angepasst. Grund für die Auswahl war unter anderem das Ausgabeformat der Koordinaten (lokal bzw. UTM), wodurch etwaige Umrechnungen (von Grad) beim Programmieren erspart wurden.

Eine Übersicht der Formatbeschreibungen der in Spider gängigen NMEA-Formate ist dem Anhang beigelegt, um die Abstimmung des MATLAB-Programmes zu erleichtern.

Da präzise Ephemeriden nicht zur Verfügung standen, wurden broadcasting Ephemeriden genutzt. Weiterhin hätte sich ein Smoothingfilter einschalten lassen, dieser wurde jedoch auf 0 s belassen. Als Initialisierungsmethode wurde quasistatisch gewählt. Diese Kombination aus den Methoden „On known point“ und „While moving“ bot sich deshalb an, weil nicht mit zu schnellen oder zu weiten Bewegungen der Empfänger gerechnet werden musste

Tabelle 5: Verwendbare Methoden der Initialisierung

Initialisierung	Beschreibung
On known point	Schnellste bzw. zuverlässigste Art der Initialisierung, genaue Koordinaten müssen dafür bekannt sein, nur für Empfänger die sich garantiert nicht bewegen
While moving	Mehrdeutigkeiten werden „on the fly“ gelöst, Näherungskordinaten müssen bekannt sein, für Empfänger mit erwarteten

Quasi static Bewegungen
für Empfänger mit erwarteten Bewegungen (jedoch nicht weite oder schnelle)

Als Datenrate, also Intervall in dem die Positionen neu berechnet und gespeichert wird, wurde eine Sekunde eingestellt. Die Möglichkeiten reichten dabei von 0,05 bis 60 Sekunden. Sie muss allerdings der gleichen, oder einem Vielfachen der zuvor eingestellten Beobachtungsrate entsprechen (mindestens 1 Hz) um vollständige und fehlerfreie Datenprodukte erzeugen zu können.

Außerdem ist noch die Länge des Produktes einzustellen, die im Experiment von wenigen Minuten bis zu einem Tag reichte. Hier wurde für die meisten Messungen die größtmögliche, also ein Tag gewählt. Ab dem Beginn der Messung legt Spider die Positionsdatei (*.rtl) an. Von hier an werden im Sekundentakt die aktuelle Position und andere Informationen als Zeile angehängt (Stream). Nach Ablauf der gewählten Periode wird automatisch die nächste Datei erzeugt und darin weiter geschrieben.

Nach dem Hochladen dieser Einstellungen auf die Empfänger, dem Starten der Empfänger und dem Aktivieren des Produktes beginnt Spider mit der Produkt- bzw. in diesem Fall mit der Dateierzeugung (Messbeginn).

Die Ergebnisse der Basislinie, der Höhe, Breite und Länge des Rovers und Informationen zu Satellitenanzahl und -geometrie werden von diesem Zeitpunkt an auch in Echtzeit in Spider angezeigt.

Management	CQ [m]	GDOP	Sats	Last...	Latitude	Longitude	Height	Baseline ...	Pro...	Site C...	Ref...	Processi...	Satellite System	Use ...	Send
Local Site Ser...	yes	0.011	1.6	15	02.1...	53° 33' 23.11001" N	13° 14' 41.92173" E	70.3968	5.7757 m	902	P3_2	50_1	L1/L2	GPS/GLONASS	no
										901	GMX9	50_1	L1 only	GPS only	no

Abbildung 16: Aktiviertes RT Positioning Produkt mit Position in Echtzeit (eigene Darstellung)

4.2.3.1 Langzeitbeobachtungen

Die Langzeitmessung wurde unter oben beschriebenen Einstellungen durchgeführt. Der Empfänger auf dem Benutzungsfestpunkt (P2650) wurde als Referenz(punkt) gewählt, da er die geringsten Abschattungs- und Mehrwegeeeinflüssen durch den benachbarten Dachaufbau aufweist. Die Punkte P3 und P4 mit GMX902GG(2) und GMX901 wurden jeweils als Rover bestimmt. Für beide mussten separate RT Positioning Products angelegt werden. Die Messdauer betrug 25,5 Tagen, was in 25 kompletten *.rtl-Dateien resultierte (24.09. – 19.10.2013).



Abbildung 17: Beobachtungspunkte P4, P3 und Referenzstation P25650 (Fotografie: Martin Scholz)

„Komplett“ bedeutet dabei, dass jede (Stream-) Datei mit 24 Stunden Länge und einer Sekunde Messintervall nach Abschluss aus 86400 bzw. 86401 Zeilen bestand (inklusive Kopfzeile). Dies resultierte in einer Dateigröße von 6,3 MB im NMEA-LLQ Format pro Tag und Rover.

4.2.3.2 Verschiebungen

Um die Verschiebungen in Lage zu kontrollieren, wurde ein sogenannter Kreuzschlitten eingesetzt. Dafür wurde die AS10-Roverantenne samt Höhenadapter auf diesem befestigt. Auf diese Weise war es möglich, Verschiebungen in eine Richtung kontrolliert durchzuführen.



Abbildung 18: AS10 auf Kreuzschlitten (Fotografie: M. Scholz)

Eine volle Umdrehung entsprach dabei zwei Millimetern Lageverschiebung. Zur Untersuchung der Verschiebungen wurden zwei Durchläufe vollzogen. Im ersten Durchlauf wurde acht Mal in zehnminütigen Intervallen um jeweils einen Zentimeter, im zweiten sechs Mal in den gleichen Intervallen um fünf Millimeter verschoben.

Zwischen den Durchläufen wurde neu initialisiert. Diese Verschiebungen sollten in den Koordinaten und auch grafisch erfassbar sein.

4.2.3.3 Höhenänderungen

Die Höhenänderungen waren nicht mit dem Kreuzschlitten zu realisieren. Dafür wurde auf eine etwas unorthodoxe Methode zurückgegriffen. Für die Durchführung wurde zuerst die Antenne mitsamt Höhenadapterfuß per Feststellschraube gelöst und nach oben gehalten, danach wurde eine für einen Reflektorstab vorgesehene Verlängerung mit einer Länge von 320 mm unter die Antenne geschraubt und schließlich per Feststellschraube angezogen.



Abbildung 19: Untersuchung Höhenänderungen (Fotografie: M. Scholz)

Die „Umbaumaßnahmen“ wurden schnellstmöglich, in ca. 15 Sekunden vollzogen, dennoch ließen sie sich später anhand der sekundlichen Messwerte erfassen.

Hierfür wurde ebenfalls in viertelstündlichen Intervallen gearbeitet, insgesamt wurden vier Höhenänderungen vorgenommen.

4.2.3.4 Abschattungseinflüssen

Das System sollte u. a. auf Abschattungseinflüsse untersucht werden. Dazu wurden drei unterschiedliche und unabhängige Messungen durchgeführt, eine ohne Abschattung, eine mit teilweiser Abschattung und eine mit (von einer Seite) vollständiger Abschattung. Um dies zu erreichen, wurde mit entsprechenden Hilfsmitteln (u. a. Draht) ein Holzbrett in unterschiedlichen Höhen am Messpfeiler des Zweifrequenzempfängers angebracht (s. Abb. 20). Die Messdauer betrug jeweils 45 min.

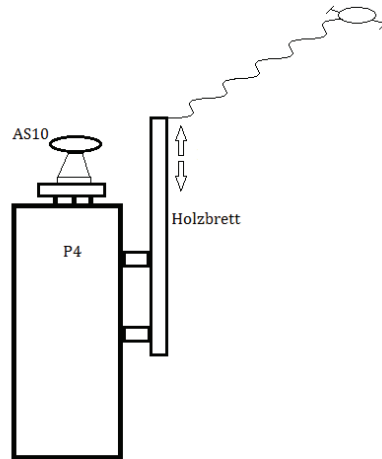


Abbildung 20: Versuchsaufbau zur Untersuchung von Abschattungseinflüssen (eigene Darstellung)

Anschließend wurden die Messergebnisse in Bezug auf das Signalrauschverhältnis (SNR), Cycle Slips (Phasensprünge) sowie Satellitengeometrien (anhand der GDOP-Werte) miteinander verglichen und Schlussfolgerungen abgeleitet. Auch die Ergebnisse der Positionierung wurden miteinander verglichen.

Phasensprünge sind ein typisches Anzeichen bei Abschattungen und führen zu verfälschten Ergebnissen.

Für die Auswertung wurden mittels Spider File Products und RT Products erstellt. Mit den in den File Products enthaltenen Beobachtungs- und Navigationsdateien war es anschließend in SpiderQC möglich sogenannte Qualitätstests durchzuführen, die die Merkmale der Messung numerisch und grafisch darstellten.

4.2.4 Datenübernahme

4.2.4.1 MATLAB

Für die Datenübernahme in MATLAB spielt das gewählte NMEA-Format eine wichtige Rolle. Danach variiert die gesamte Struktur der ausgegebenen (Stream-) Dateien. Die Dateien wurden mittels der Option „Logging“ in einem selbst definierten Pfad gespeichert. Um den Programmieraufwand zu erleichtern, wurden die Header (Kopfzeilen) der ersten Positionsdateien eines RT Positioning Produkts manuell entfernt. Alle folgenden (bzw. fortlaufenden) Dateien wurden von Spider ohne Header gespeichert.

Im erzeugten MATLAB-Programm wurde zunächst über den Befehl

```
fid = fopen('Unterordner/Dateiname.rtl', 'r');  
die gewünschte Datei geöffnet und gelesen.
```

Die Zeilen der ausgegebenen *.rtl-Datei (im NMEA-LLQ-Format) haben folgende Form:

```
$GPRLLQ,173527.00,092313,383741.342,M,5935601.469,M,2,07,0.738,70.391,M*1A  
  
($GPRLLQ, UTC, Datum, Easting, Meter, Northing, Meter,  
GNSSQualitätsindikator, Satelliten genutzt, Koordinatenqualität, Höhe,  
Meter, Checksum, Carriage Return, LineFeed)
```

Deshalb wurden als nächstes mittels *textscan*-Command die einzelnen Objekte in Formatklassen beschrieben, und die benötigten Elemente (Zeit, (Datum,) Easting, Northing, Höhe) in einem sogenannten *Cell Array* abgelegt.

```
A = textscan(fid, '%*s %f %s %f %*s %f %*s %*d %*d %*f %f %*s',  
'delimiter', ',');  
fclose(fid);
```

s	Lesen eines Strings
f	Lesen einer Nummer und Konvertierung in Double-Wert
d	Lesen einer Nummer und Konvertierung in int32-Wert
*	ignorieren
delimiter	Trennzeichen (,)

Anschließend wurde der *Cell Array* in Vektoren umgewandelt:

```
UTC = [A{1};  
Date = [A{2};  
East = [A{3};  
North = [A{4};  
Height = [A{5};  
  
% Arrays initialisieren  
Y(1) = 0;  
X(1) = 0;  
Z(1) = 0;
```

Mit Hilfe einer *for*-Schleife ließen sich dann die Koordinaten- bzw. Höhendifferenzen zwischen den einzelnen Beobachtungen berechnen und unter Anwendung des *plot*-Befehls grafisch ausgeben.

Auch konnten Mittelwerte und Standardabweichungen (*std*) für die enthaltenen Beobachtungen ausgegeben werden. Das vollständige Programm ist dem Anhang beigelegt.

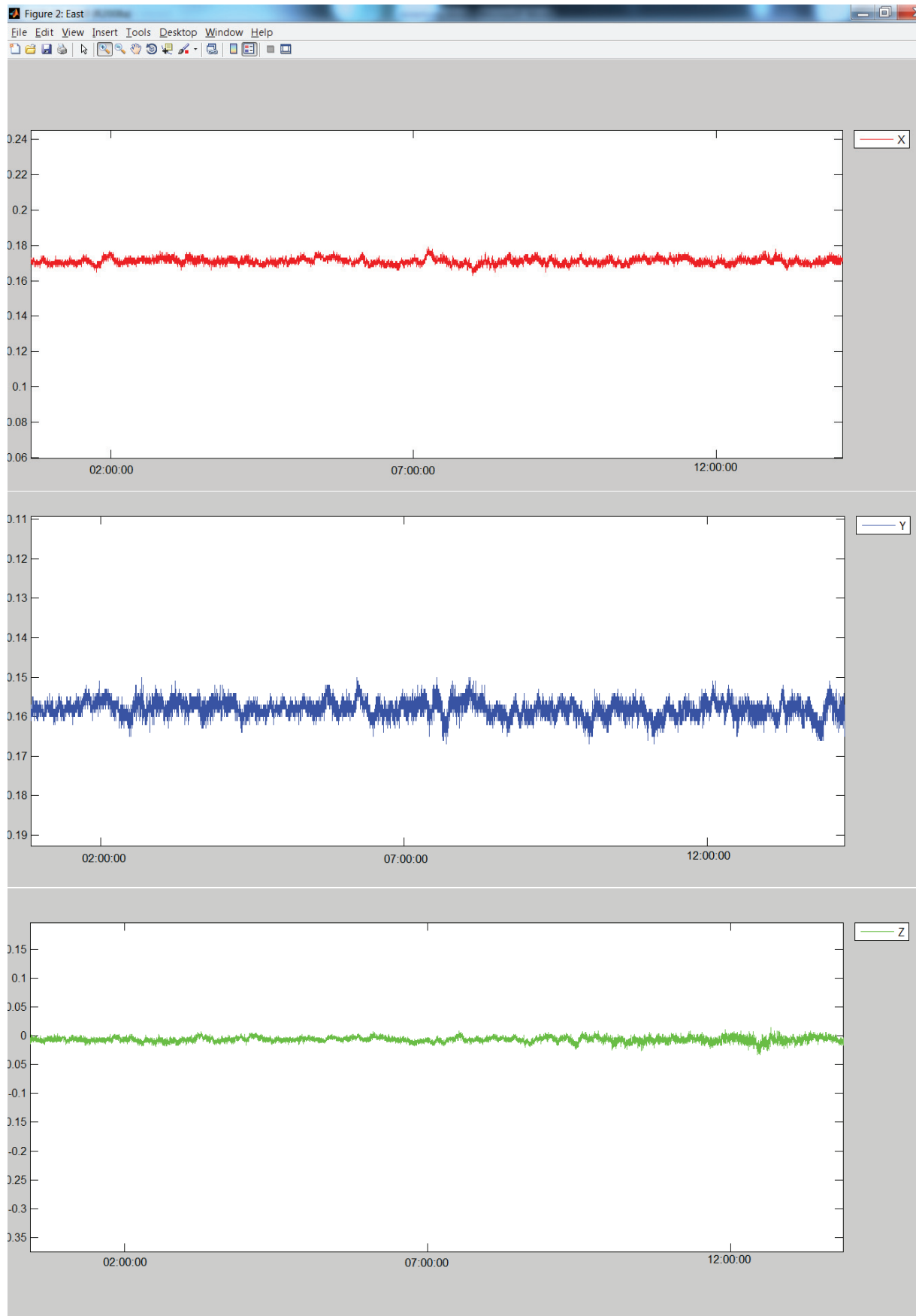


Abbildung 21: MATLAB - Koordinaten- und Höhendifferenzen [m] des GMX902-Empfängers über einen halben Tag betrachtet (eigene Darstellung)

Weiterhin war es möglich, die Mittelwerte pro Tag bzw. pro Messung, sowie die Standardabweichungen für Easting, Northing und Höhe zu berechnen und auszugeben. Wie bereits erwähnt, beinhaltete eine Tagesdatei der Langzeitmessung 86400 Zeilen mit Koordinaten und Höhe. Für eine Gesamtbetrachtung mit MATLAB wurden alle 25 Dateien mithilfe des Windows Command-Line-Interpreters cmd.exe zu einer zusammengefasst. Die „Gesamt.rtl“-Datei verfügte anschließend über 2.160.000 Zeilen, mit dreimal so vielen Messwerten und einer Gesamtgröße von 156 MB. Das Berechnen, Ausgeben und Plotten der Koordinatendifferenzen zzgl. Mittelwerten und Standardabweichungen nahm trotz Optimierung mit `for`-Schleifen etwa 15 Stunden pro Rover in Anspruch. Die Berechnungen für einen Tag dagegen konnten binnen Sekunden gemeistert werden.

4.2.4.2 Leica SpiderQC

Zu Beginn der Arbeit mit dem Programm Spider wurde die Funktion „File Product“ („Datenprodukt“) untersucht.

Mit ihrer Hilfe lassen sich die rohen Beobachtungsdaten (von GPS und GLONASS) im RINEX-Format speichern. Ebenso ist für einen Teil der Empfängertypen ein von Leica entwickeltes binäres MDB-Format verfügbar (jedoch nicht für Sensoren der GMX900-Reihe). Die File Products bzw. die Rohdaten lassen sich nach Aufzeichnung mit der Funktion „PP Positioning“ im Postprocessing auswerten. Weiterhin ist es möglich, Ereignisberichte des Programms und sogenannte Quality Check-Reports auszugeben.

Letztere sind im HTML-Format gehalten und können mittels Browser angezeigt werden. Mit ihnen lassen sich die Beobachtungs-, Navigations- und GLONASS-Dateien durch programminterne Qualitätstests bewerten. So wird es möglich, einen ersten Indikator über den Verlauf der Beobachtung zu bekommen. Sie enthalten u. a. die Anzahl beobachteter Satelliten, gemessener Epochen, Cycle Slips (Verlust der Phasenbeziehung), sowie Angaben zu Mehrwegeeffekten, Datenvollständigkeit und Satellitengeometrie (PDOP, GDOP).

Generell gibt es in Spider nur wenige grafische Darstellungsmöglichkeiten. Darin werden lediglich Angaben zu beobachteten Satelliten, aktuellen Satellitenkonstellationen für die einzelnen Empfänger und das Signalrauschverhältnis in Diagrammen ausgegeben.

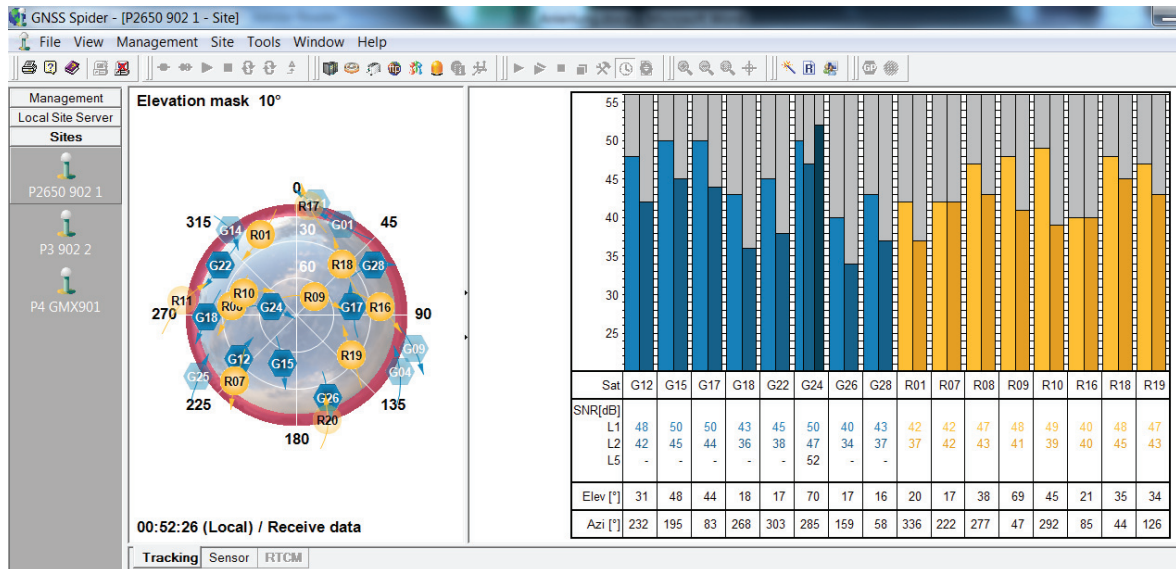


Abbildung 22: Grafische Ansicht Satellitenkonstellation und SNR in Spider (eigene Darstellung)

Allerdings können die Dateien im RINEX-Format in das Zusatzprogramm SpiderQC eingelesen werden. Damit lassen sich u. a. Grafiken bezüglich SNR oder Multipath über Elevation oder Satellitenverfügbarkeit ausgeben.

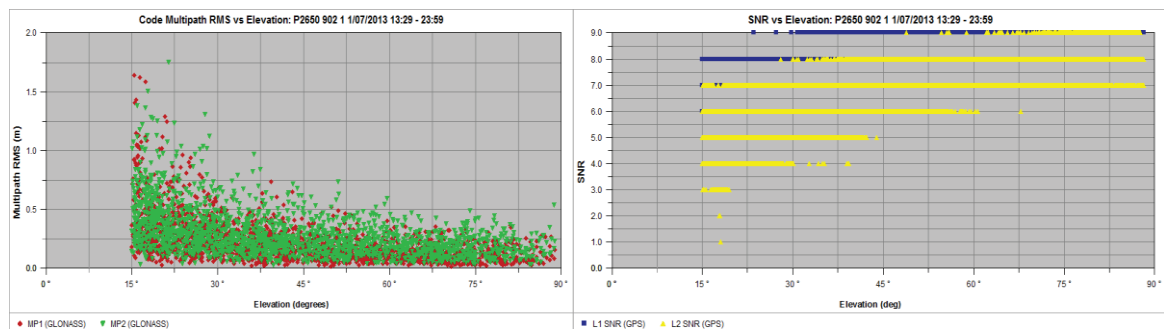


Abbildung 23: Diagramme SNR bzw. Multipath/Elevation (eigene Darstellung)

Die mit GNSS Spider gewonnenen Positionsdaten können auch in Leica SpiderQC eingelesen und grafisch ausgegeben werden.

Dafür müssen die Positionen nicht extra auf der Festplatte gespeichert, sondern können direkt zwischen den Programmen als NMEA-Verbindung (via TCP/IP) ausgetauscht werden. Dazu bedarf es lediglich eines mit Spider festgelegten nutzbaren Ports und der Ausführung des RT Positioning Produkts.

Die NMEA-Verbindung kann anschließend unter Eingabe des Passwortes direkt in SpiderQC geöffnet werden. Mit ihrer Hilfe lassen sich die Koordinaten- und Höhendifferenzen in Echtzeit grafisch ausgeben und es wird möglich z. B. Grenzwerte zu definieren, bei deren Überschreitung entsprechende Meldungen (via Email/SMS) ausgesendet werden können.

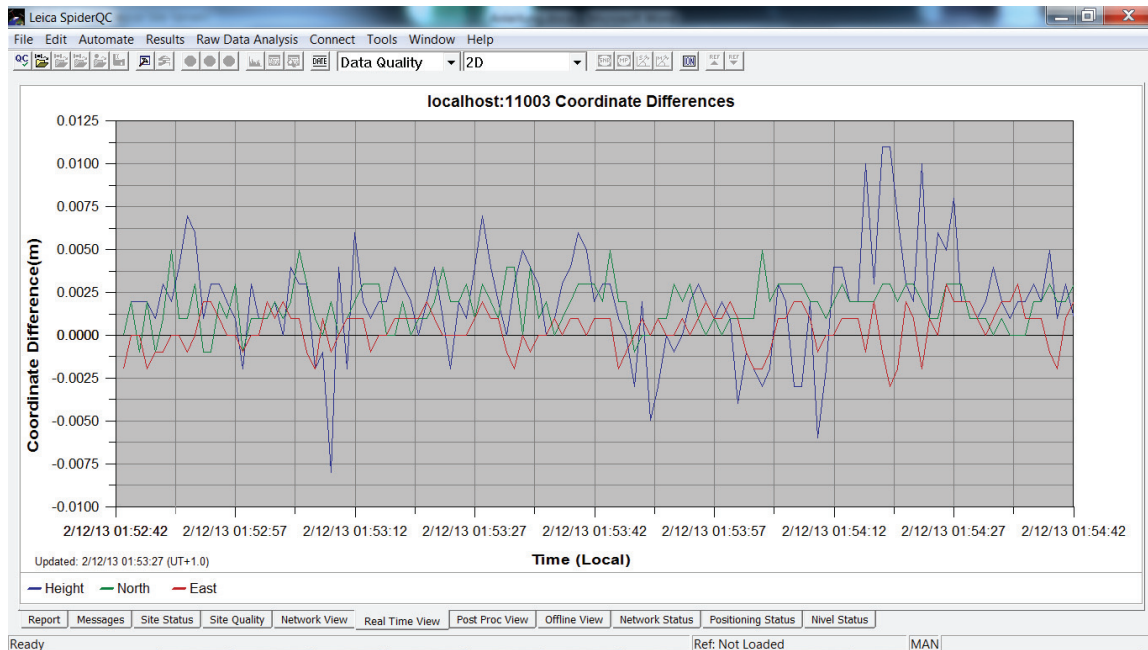


Abbildung 24: Grafische Ausgabe der Koordinaten- und Höhendifferenzen mittels Leica SpiderQC (eigene Darstellung)

4.3 Ergebnisse

Bei der Auswertung der Messungen war als erstes festzustellen, dass die Datenaufzeichnungs- bzw. Positionsspeicherungsrate mit einer Sekunde vielleicht doch etwas zu optimistisch gewählt wurden. Der Umfang der den Berechnungen zugrunde liegenden Daten war enorm.

4.3.1 Untersuchung von Langzeitbeobachtungen

Das System war auf Langzeitkonstanz und die Ergebnisse auf Trends bzw. Periodizitäten zu untersuchen.

Über die gesamte Messdauer mit dem GMX902-Rover blieben die Phasenbeziehungen konstant erhalten. Lediglich einmal musste, nach Beginn der Messung, erneut initialisiert werden. Sonst lag zu jeder Zeit eine Fixed-Lösung vor. Dies lag wohl einerseits daran, dass sich der Rover weder schnell noch besonders weit bewegte und sich auch die Abschattung nicht sonderlich veränderte.

Der Verlust der Phasenbeziehung wurde in den erstellten Graphen der Koordinaten- und Höhendifferenzen erkannt. Alle drei Diagramme wiesen einen starken Anstieg (bzw. Sprünge) auf, hier anhand der Easting-Differenzen gezeigt:

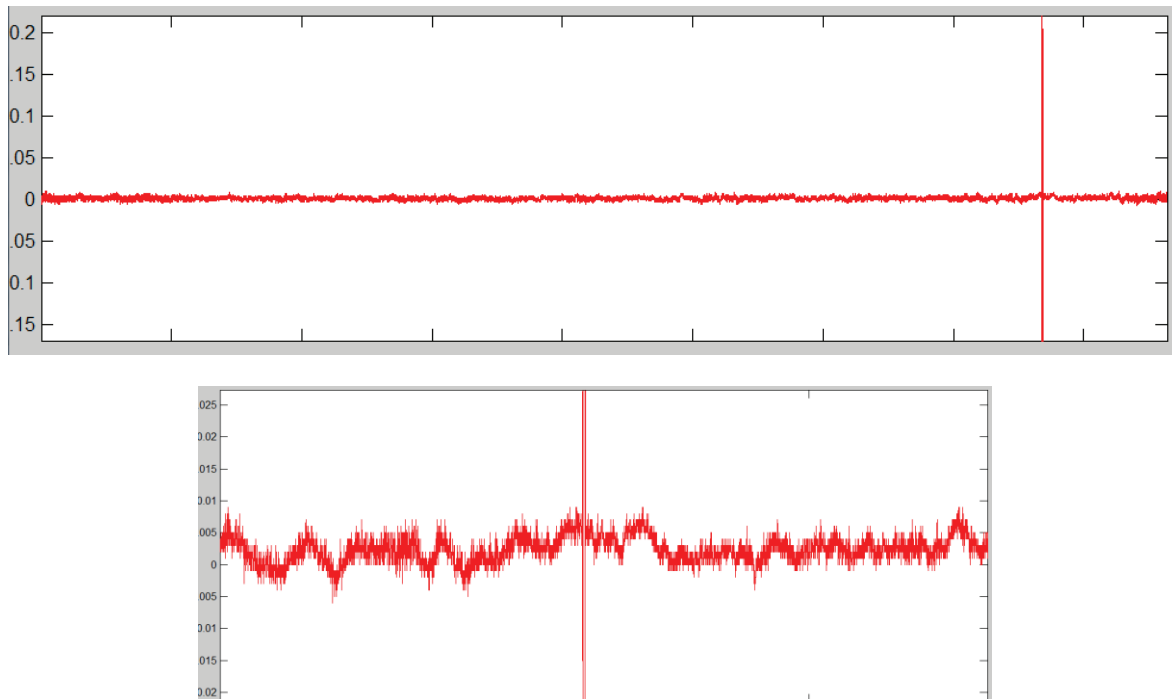


Abbildung 25: Koordinatendifferenzen East [m] über 25 Tage (eigene Darstellung)

Alle drei ausgegebenen Diagramme ähnelten sich in dieser Beziehung und die Messdatei konnte im näheren Zeitraum genauer betrachtet werden. Für etwa 40 Sekunden ab 06:21:38 Uhr (UTC) am 03.10.2013 waren die Beziehungen nicht genau bestimmt, so dass der Empfänger in den Float-Modus wechselte. Die Koordinaten änderten sich deshalb sprunghaft um insgesamt mehr als 80 cm in East- und North-Wert und etwa 25 cm in der Höhe. Warum und wie es dazu kam ist unklar. Bis zum Auftritt dieser Anomalie wurden insgesamt 13 GPS- und GLONASS-Satelliten beobachtet. Mit dem Verlust der Mehrdeutigkeiten stieg die Anzahl allerdings auf 15 an um 40 s später wieder auf 13 zurückzufallen. Denkbar wäre demnach, dass die neu hinzu gekommenen Satelliten unter extrem niedriger Elevation sowie dem Einfluss von Signaldiffraktion beobachtet wurden, was zum Abbruch der Fixed-Lösung führte. Um dies zu vermeiden sollten bei zukünftigen Messungen eher Elevationsmasken im Bereich 12° bis 15° gewählt werden. Über die Dauer der Messung lag die Fixed-Lösung bis auf diese eine Ausnahme in Beziehung zu 12 bis 18, seltener 10/11 oder 19/20 Satelliten vor.

Anders verhielt es sich bei der Langzeitmessung mit dem Einfrequenzempfänger GMX901, welcher „nur“ L1-Signale von GPS empfangt. Es traten vermehrt Verluste der Phasenbeziehungen und somit der Fixed-Lösung auf. Auffällig war dabei die Periodizität des Auftretens. Es schien sich jeden Tag gleichmäßig zu wiederholen, insbesondere in dem Zeitraum von 08:20 bis 10:20 Uhr (28.09.2013) und jeweils ca. 24 Stunden später. Der GMX901-Empfänger besetzte von den drei genutzten Punkten den, welcher sich am nächsten zum Dachaufbau befand. Die Abschattung war somit größer als bei den anderen Empfängern. In Verbindung mit der Verwendung nur eines Systems und etwa nur halb so vielen zur Verfügung stehenden Satelliten war

dies äußerst kritisch. Die Periode von „ca. 24 Stunden“ entspricht der Umlaufzeit der GPS-Satelliten in Zusammenhang mit der Umlaufzeit der Erde. Die Satellitenkonstellation zu diesen Zeitpunkten war gleich und für den hier verwendeten Messaufbau ungünstig. Jeden Tag waren die Aussetzer etwa vier Minuten früher zu beobachten. In diesen Momenten sank die Anzahl der verfügbaren Satelliten auf bis zu vier hinab, was eine genaue Positionierung ermöglichen sollte, doch auch mit sieben Satelliten gab es Störungen. Aufgrund nur einer verwendeten Frequenz könnten ionosphärische Einflüsse sowie ungünstige Satellitenkonstellationen der Grund dafür sein. Sonst waren Signale von vier bis acht, seltener von bis zu elf Satelliten zu empfangen. Aber auch dazwischen traten vereinzelt kürzere Abstände mit Float-Lösung auf.

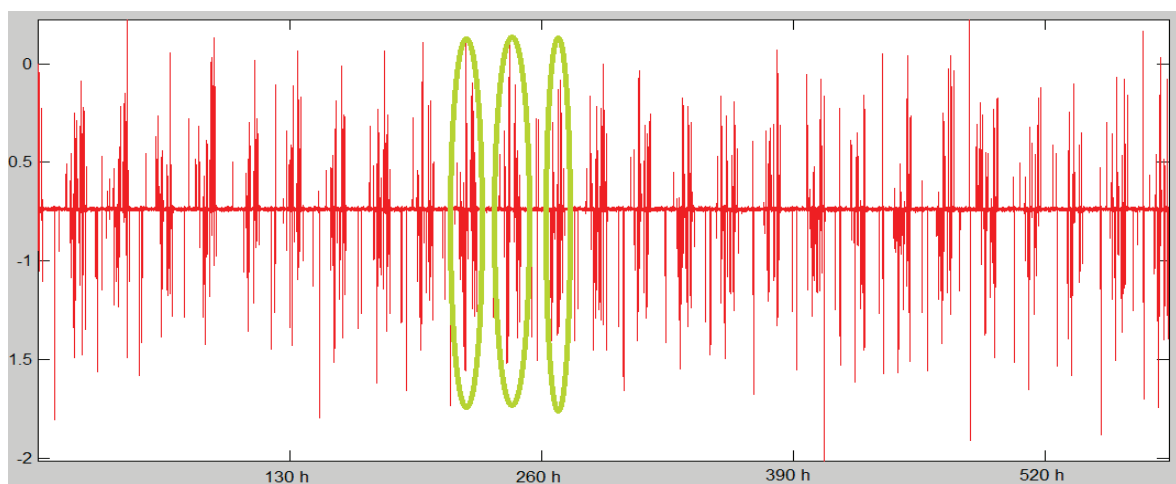


Abbildung 26: GMX901 - Periodische Verluste der Trägerphasenbeziehungen sichtbar an den East-Wert-Differenzen [m] (eigene Darstellung)

Aufgrund der hohen Anzahl an Positionsdaten, die einerseits erhöhte Berechnungs- und Ausgabezeiten in MATLAB verursachten, und die eine grafische Betrachtung erschwerten, wurden genauere Trends in Excel untersucht. Dafür wurden mit MATLAB die Mittelwerte für die East-, North- und Höhenwerte der einzelnen Messtage ausgegeben und in Excel geplottet. Dort wurden weiterhin Trends mit Hilfe von Polynomen dargestellt. Dies und die Funktionsgleichungen lassen sich den folgenden Diagrammen entnehmen, auch wurden diese Schritte für beide Empfänger durchgeführt.

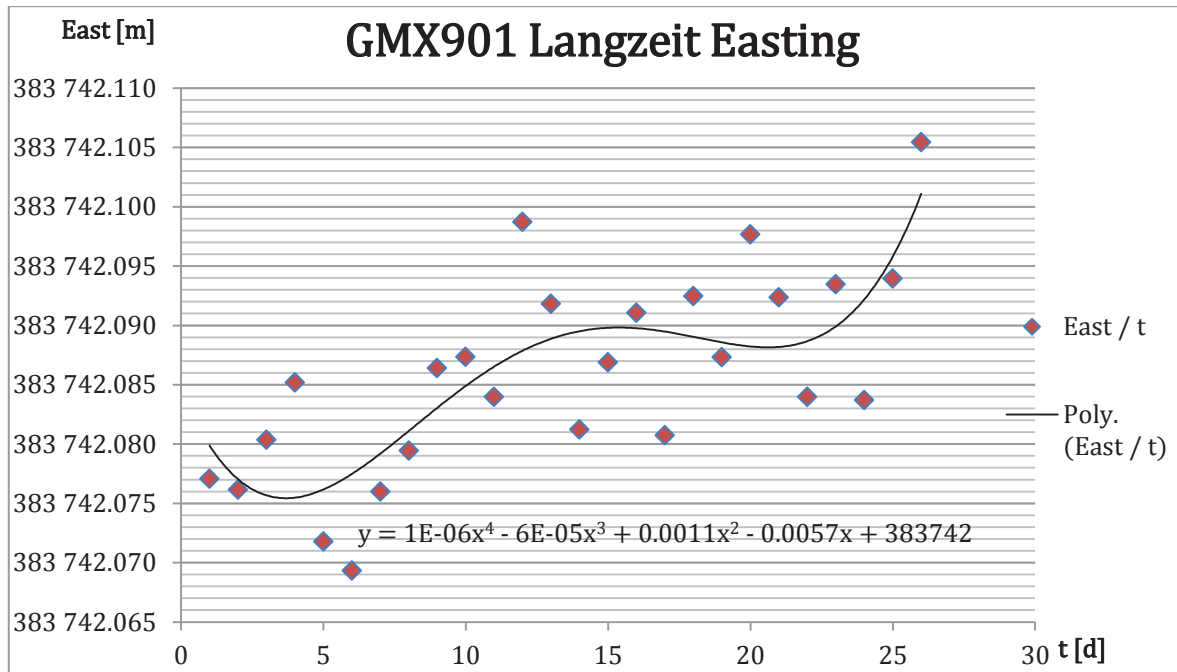


Abbildung 27: GMX901 - gemittelte East-Werte pro Tag (eigene Darstellung)

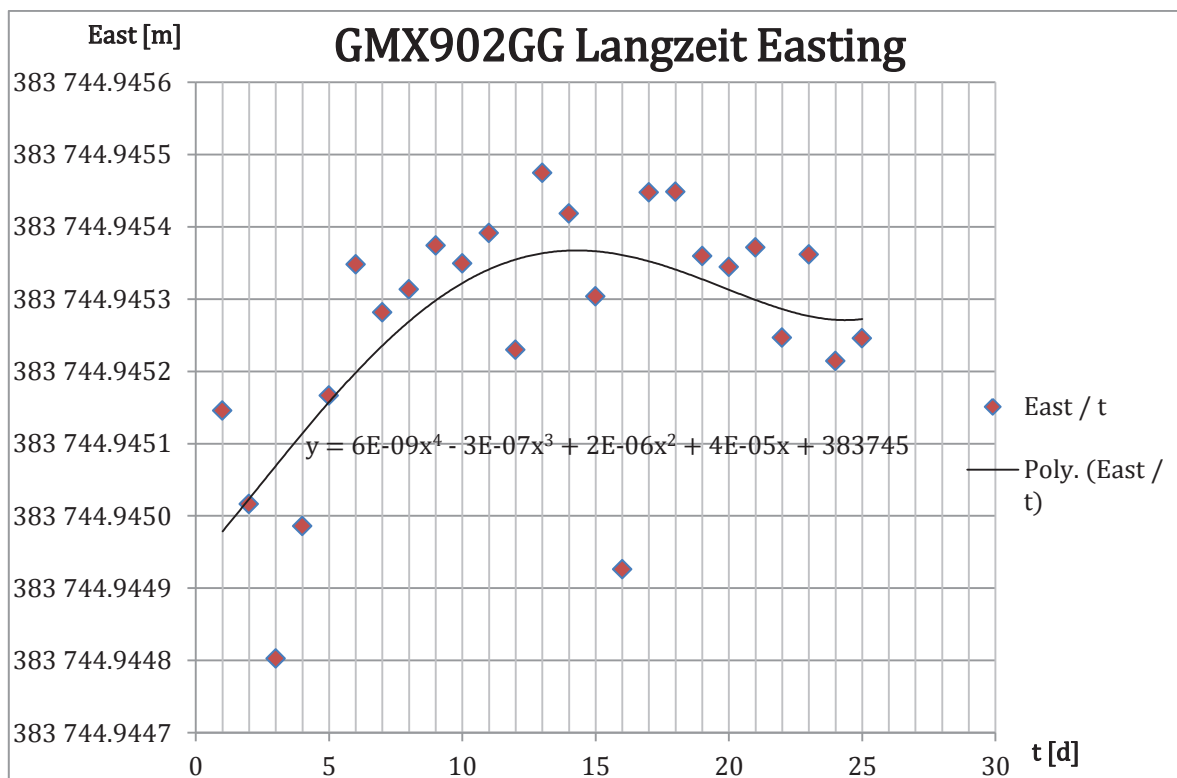


Abbildung 28: GMX902GG - gemittelte East-Werte pro Tag (eigene Darstellung)

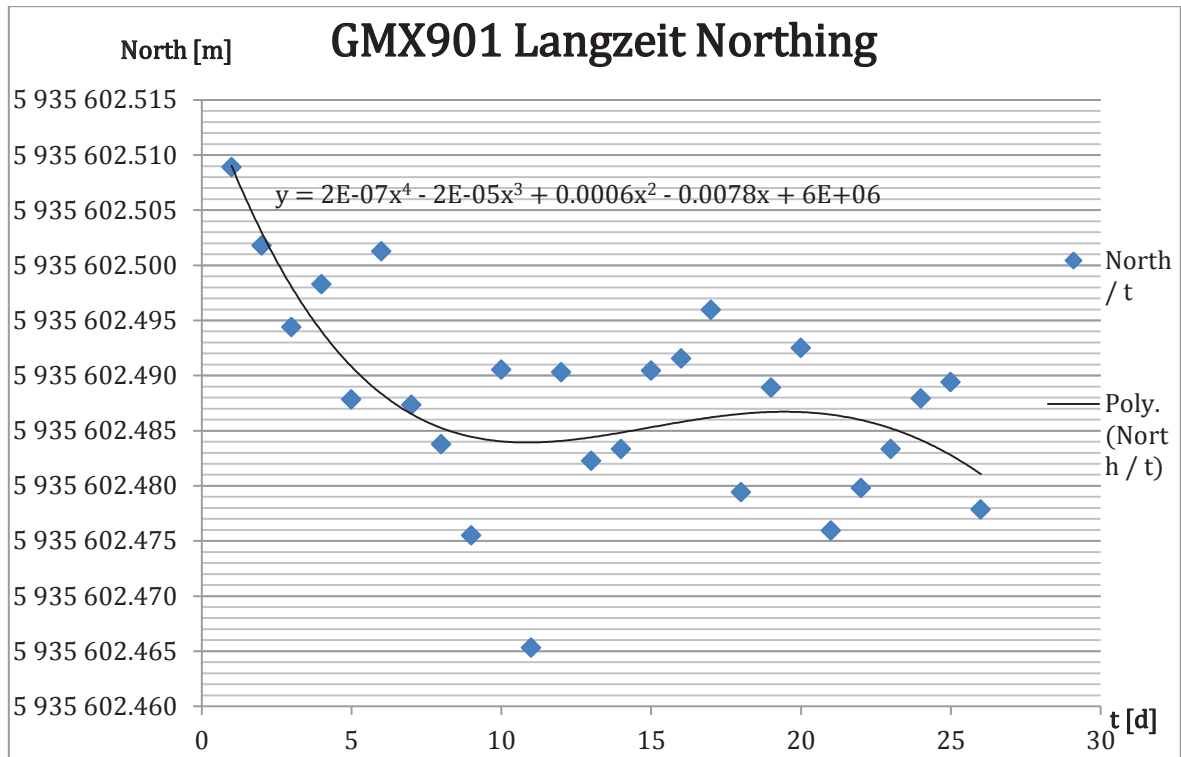


Abbildung 29: GMX901 - gemittelte North-Werte pro Tag (eigene Darstellung)

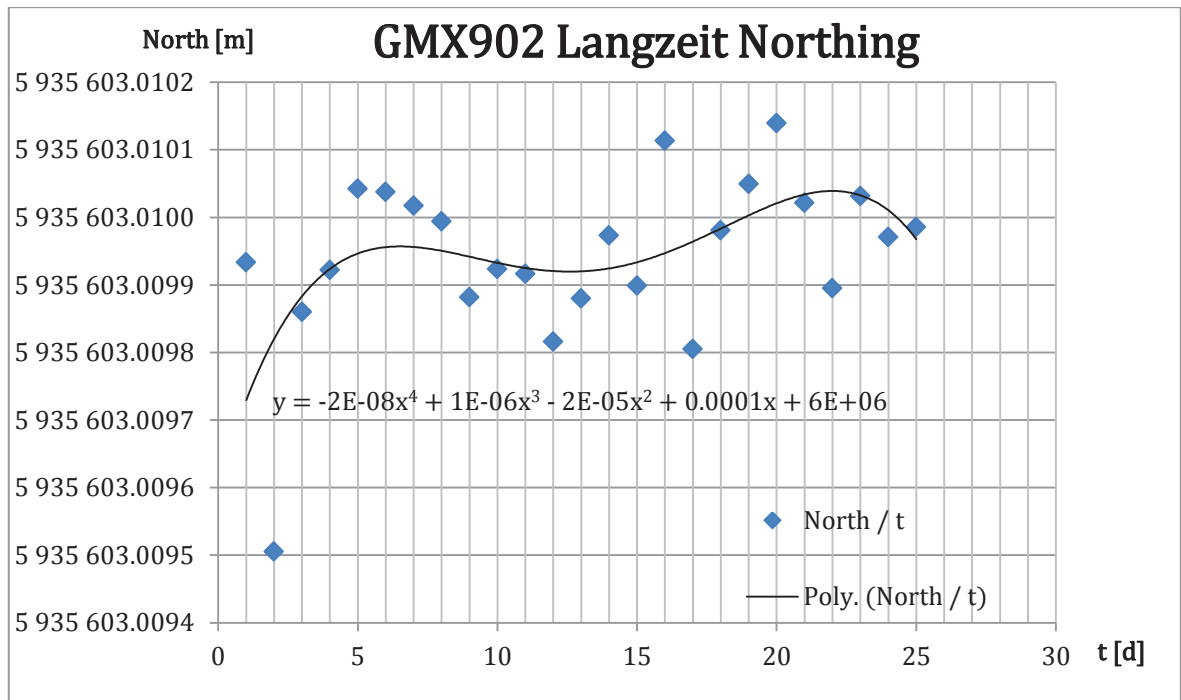


Abbildung 30: GMX902GG - gemittelte North-Werte pro Tag (eigene Darstellung)

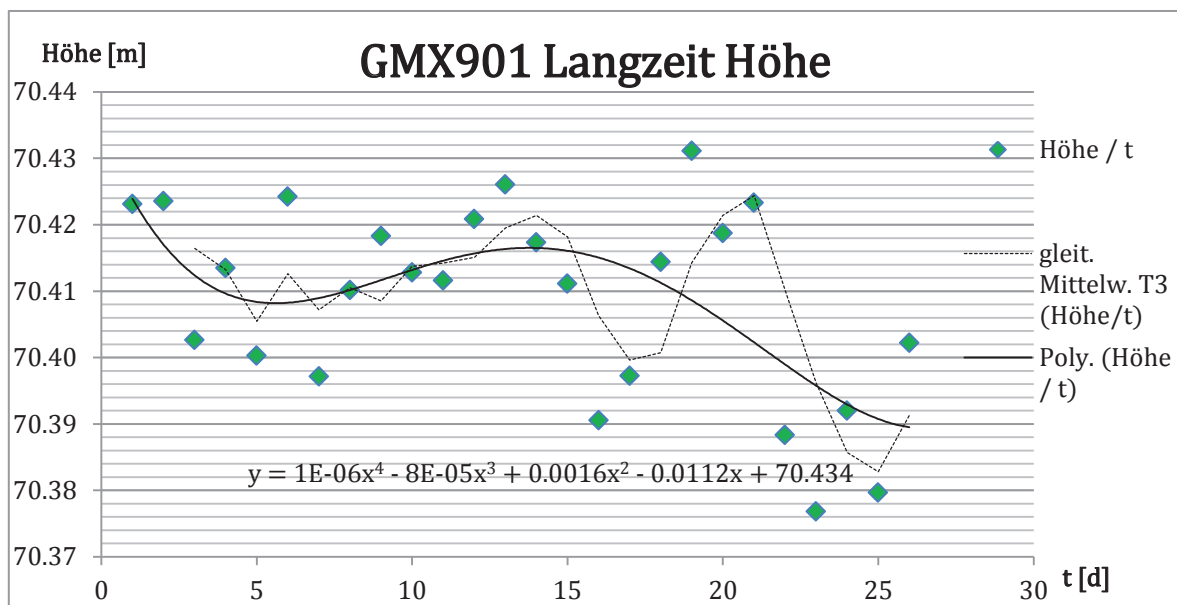


Abbildung 31: GMX901 - Gemittelte Höhen pro Tag (eigene Darstellung)

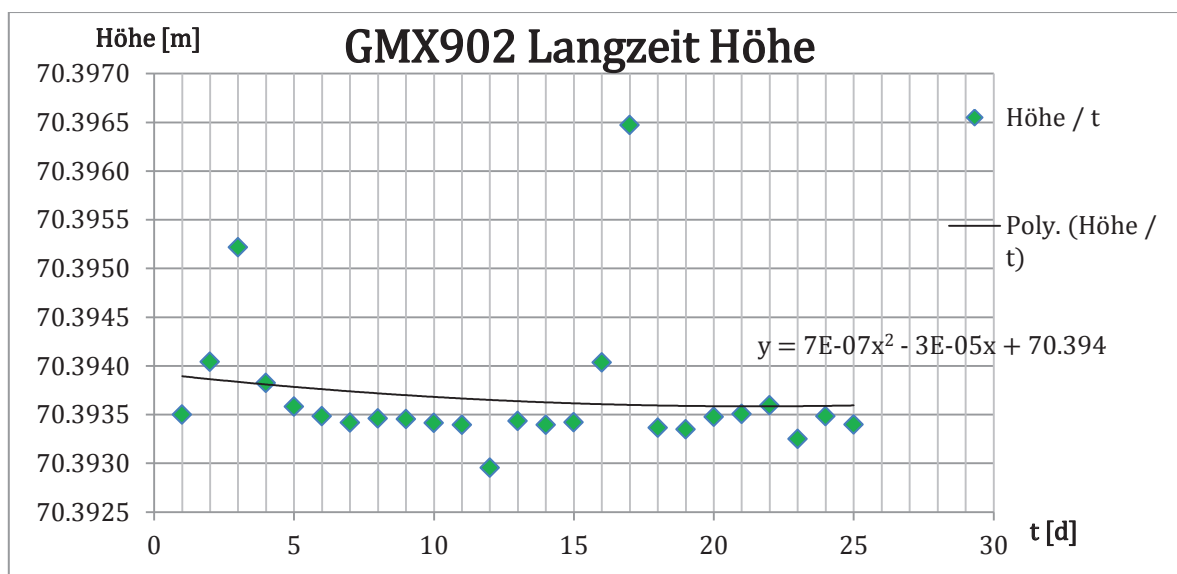


Abbildung 32: GMX902GG - gemittelte Höhen pro Tag (eigene Darstellung)

Mit einer Ausnahme ließen sich die Trends der Mittelwerte der Langzeitmessungen gut über Polynome der vierten Ordnung beschreiben. Beim Zweifrequenzempfänger schwankten die Werte für East und North im Zehntel-Millimeterbereich und die Höhe im Millimeterbereich. Im Fall des GMX901-Empfängers waren die Lagewerte um drei bis vier und die Höhen um bis zu fünf Zentimeter verteilt. Dies ist besonders darauf zurückzuführen, dass die teilweise stark vertretenen Float-Lösungen in die Berechnung mit einbezogen wurden. Mit MATLAB wurden folgende Standardabweichungen für die Gesamtmessung mit über 2.400.000 Positionswerten ermittelt:

Tabelle 6: Standardabweichungen Langzeitmessung

	σ_E [m]	σ_N [m]	σ_H [m]
GMX901	0,1148	0,1917	0,2700
GMX902GG	0,0020	0,0023	0,0042

Für präzise Überwachungsmessungen eignen sich daher die Zweifrequenz-, nicht aber die Einfrequenz-GNSS-Empfänger. Die Standardabweichungen der Einzelwerte beim Einfrequenzempfänger fallen so hoch aus, da auch die zahlreichen Float-Lösungen mit in die Auswertung übernommen wurden. Nach Ablauf der Messung wurden folgende mittlere Koordinaten für die Punkte P3 und P4 ermittelt:

Tabelle 7: Gemittelte Koordinaten nach Abschluss der Langzeitmessung

	East [m]	North [m]	Höhe [m]
P3 GMX902GG	383744,9453	5935603,0099	70,3937
P4 GMX901	383742,0859	5935602,4878	70,4087

Zum Abschluss dieser Messung wurden die Koordinaten des Punktes P4 im Rahmen zweier unabhängiger Messungen á 24 Stunden mit dem GMX902GG erneut bestimmt. Daraus leitet sich folgender Vergleich ab:

Tabelle 8: Vergleich des Punktes P4 mit zwei Empfängern

	East [m]	North [m]	Höhe [m]
GMX901	383742,0859	5935602,4878	70,4087
GMX902GG	383742,0774	5935602,5260	70,3888
Differenz	0,0085	-0,0382	0,0200

Während sich die Tageswerte des GMX902GG nur sehr leicht (um rund $\frac{1}{6}$ mm) voneinander unterscheiden, lagen die Differenzen zwischen den Empfängertypen im Zentimeterbereich. Anzumerken ist dabei, dass die Position an sich im Hinblick auf Monitoringsysteme meist eine untergeordnete Rolle spielt, vielmehr ist die Positionsgenauigkeit des Empfängers und dessen Konstanz entscheidend. Diese lag für den Einfrequenzempfänger von Tag zu Tag betrachtet im Zentimeterbereich. Der größte tägliche Unterschied in der Lage lag bei 2,5 cm und in der Höhe bei 3,5 cm. Für den Zweifrequenzempfänger lagen diese Unterschiede in der Lage im Bereich von 0,5 mm und in der Höhe bei maximal 3,1 mm.

Anhand der von MATLAB ausgegebenen Koordinatendifferenzen lässt sich auch das Messrauschen analysieren. Dabei gab es auch beim gleichen Empfänger unterschiedliche Einflüsse auf East, North und Höhe festzustellen.

Die Messwerte sind scheinbar entlang einer periodischen Schwingung verteilt und nahmen für den Durchschnittstag der AS10-Antenne mit GMX902-Empfänger eine Spitzen-Spitzen-Amplitude von rund 1 cm für den East-, 1,5 cm für den North-, und 3 cm für den Höhenwert ein. Beim GMX901 lagen diese Werte bei durchschnittlich 2 cm im East-, 2,5 cm im North- und 4 cm im Höhenwert (Phasenbeziehungsverluste ausgenommen). Zwischen den einzelnen Messungen fielen diese Werte deutlich geringer aus, beim GMX902GG lagen die Differenzen unter 2 mm in der Lage und Höhe. Für den GMX901 lagen sie unter 3 mm in Lage und 4 mm in Höhe. Die Effekte des Messrauschens wurden durch Mittelbildung minimiert.

Mit SpiderQC wurden weiterhin die Rohdaten beider Empfänger von einem gewählten Durchschnittstag (16.10.2013 – kein bis leichter Niederschlag, keine bis leichte Bewölkung) ausgewertet. Dabei wurden 57 Phasensprünge für den Zweifrequenzempfänger (GPS und GLONASS) und 68 für den GMX901 (nur GPS) beobachtet. Die mittlere Signal-to-Noise-Rate lag beim GMX902GG mit AS10 bei 47 dB (L1 und G1) und 43,1 dB (L2 und G2), beim Einfrequenzempfänger lag der Wert bei 45 dB. Für ersteren konnten weiterhin Werte für die Empfänger-Satellitengeometrie berechnet werden um die Qualität der Messung zu beschreiben. Für die 3D-Positionsgenauigkeit (PDOP) wurden 3,1, für die Gesamtgenauigkeit (3D über Zeit) 3,7 angegeben. Eine Einschätzung der DOP-Werte des GMX901 war anhand der L1-Signale mittels SpiderQC nicht möglich.

Auf eine Ausgleichung zur Trendanalyse der gesamten Beobachtungen, wurde aufgrund der bereits erwähnten Rechenzeiten mit MATLAB verzichtet. Jedoch wurde eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen für die Ergebnisse eines Tages des Zweifrequenzempfängers mit dem funktionalen Modell der Form $\hat{Y}_{[m]} = Y_{[m]} + v = \Phi(\hat{T}) = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 * T_{[s]} + \hat{b}_2 * T_{[s]}^2 + \hat{b}_3 * T_{[s]}^3 + \dots$ durchgeführt (Polynomansatz).

Die Zeit, bzw. der Messintervall von einer Sekunde, wird dabei als fehlerfrei, die einzelnen Mess- bzw. Ergebniswerte als voneinander unabhängig und mit konstanter Genauigkeit gemessen angesehen. Deshalb kann die Gewichtsmatrix P (gleich der inversen Kofaktormatrix Q_{LL}) als Einheitsmatrix der Dimension n,n (n Beobachtungen) geschrieben werden. Dafür ergibt sich die Koeffizientenmatrix (Designmatrix) mit den Werten der partiellen Ableitungen der Funktionen nach den

$$\text{Unbekannten } A = \left(\frac{\partial \Phi(T)}{\partial x} \right)_0 = \begin{bmatrix} 1 & T_{1[s]} & T_{1[s]}^2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots \\ 1 & T_{n[s]} & T_{n[s]}^2 & \dots \end{bmatrix}.$$

Die linearisierte Verbesserungsgleichung ist die Summe der gekürzten Beobachtungen ($l_{n,1}$) und der Verbesserungen ($v_{n,1}$) gleich dem Produkt aus

$$\text{Designmatrix } A \text{ und dem aufzulösenden Unbekanntenvektor } \hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{b}_0 \\ \hat{b}_1 \\ \vdots \end{bmatrix}.$$

Die Varianz der Gewichtseinheit (apriori) σ_0^2 wird gleich der geschätzten Varianz der Gewichtseinheit (aposteriori) s_0^2 gleich 1 cm² angenommen.

Globaltest und Individualtest sollen den sinnvollen Einfluss des Vektors bzw. dessen einzelner Parameter für die Lösung des Ausgleichungsproblems beschreiben. Dabei wird normalerweise vom linearen zum polynomischen Ansatz „vorwärts“ gearbeitet, bis die Schätzung der Koeffizienten nicht mehr signifikant ist. Die passendste Lösung wäre der vorherige Ansatz (FOPPE und NEITZEL, 2014).

Die Beantwortung der Frage nach den für diese Tests verwendbaren Freiheitsgraden ist für den Fall der in dieser Arbeit durchgeführten GNSS-Messungen schwierig. Es fanden sehr viele Beobachtungen statt, unklar ist auch, welche Größe (Zeit oder Strecke) zur Bestimmung gewählt werden soll. Aus diesen Gründen wurde die Anzahl der Freiheitsgrade gegen unendlich angesehen. Für einen Konfidenzbereich von 95 % ergibt sich damit für die t-Verteilung ein Quantil von 1,96, welches mit den individuellen Testgrößen zu vergleichen ist.

In MATLAB wurden Verbesserungsgleichungen mit Hilfe der Funktion *polyfit* aufgestellt. Für die weitere Ausgleichung und Signifikanztests (global und individuell) wurden als erstes Design- und Gewichtsmatrix (A und P), anschließend die Normalgleichungsmatrix aufgestellt ($N_{u,u} = A^T * P * A$). Auch hier wurden die Grenzen des MATLAB zur Verfügung stehenden Speichers erreicht. Für Rechnungen mit Matrizen wie u. a. der P-Matrix mit 86400² Werten (Integer) á 8 bit würden etwa 57 Gigabyte Speicher benötigt werden, dem Programm stehen jedoch standardmäßig nur ca. zwölf Gigabyte für die Berechnungen zur Verfügung. Deshalb wurden für die weitere Auswertung nur jeder sechzigste Wert ($\equiv 1$ min) einbezogen, was 1440 Messwerten gleichkommt ($T_{[s]} \rightarrow T_{[min]}$).

Weiterhin wurde angenommen, dass $N = Q_{\hat{x}\hat{x}}^{-1}$ und $Q_{\hat{x}\hat{x}} * s_0^2 = \Sigma_{\hat{b}\hat{b}}$. Der Globaltest wurde mit der Formel $\hat{F} = \frac{\hat{b}^T * \Sigma_{\hat{b}\hat{b}}^{-1} * \hat{b}}{q}$ und q = Anzahl der Verbesserungsgleichungsunbekannten durchgeführt und mit $F_{q,f,1-\alpha} = F_{q,\infty,0.95}$ verglichen. Für die Berechnung der Ergebnisse des t-Tests kam $\hat{t}_i = \frac{\hat{b}_i}{s_i}$ mit $s_i = 0,01$ m zur Anwendung.

Tabelle 9: Ergebnisse Ausgleichung Langzeitmessung

Verbesserungsgleichung $Y_{[m]} = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 * T_{[min]} + \dots$			
	East	North	Height
\hat{b}_0	0.003362	-0.000855	0.005702
\hat{b}_1	7.552E-09	-1.282E-09	1.873E-08
\hat{b}_2			
H_0	$E\{b_{(i)}\} = 0$	$E\{b_{(i)}\} = 0$	$E\{b_{(i)}\} = 0$
H_A	$E\{b_{(i)}\} \neq 0$	$E\{b_{(i)}\} \neq 0$	$E\{b_{(i)}\} \neq 0$
F	39.5	39.5	39.5
\hat{F}	5632.3112	364.1773	16197.7376

T	1.96	1.96	1.96
\hat{t}_0	0.3362	-0.0855	0.5702
\hat{t}_1	7.55E-07	-1.28E-07	1.87E-06
\hat{t}_2			
Entscheidung F	H_A annehmen	H_A annehmen	H_A annehmen
Entscheidung t_0	H_0 annehmen	H_0 annehmen	H_0 annehmen
Entscheidung t_1	H_0 annehmen	H_0 annehmen	H_0 annehmen
Entscheidung t_2			

Die Werte \hat{b}_1 beschreiben damit den Anstieg der Funktionen, z. B. im Fall des East-Werts einen Trendanstieg von $\frac{1}{100}mm$ über 24 Stunden.

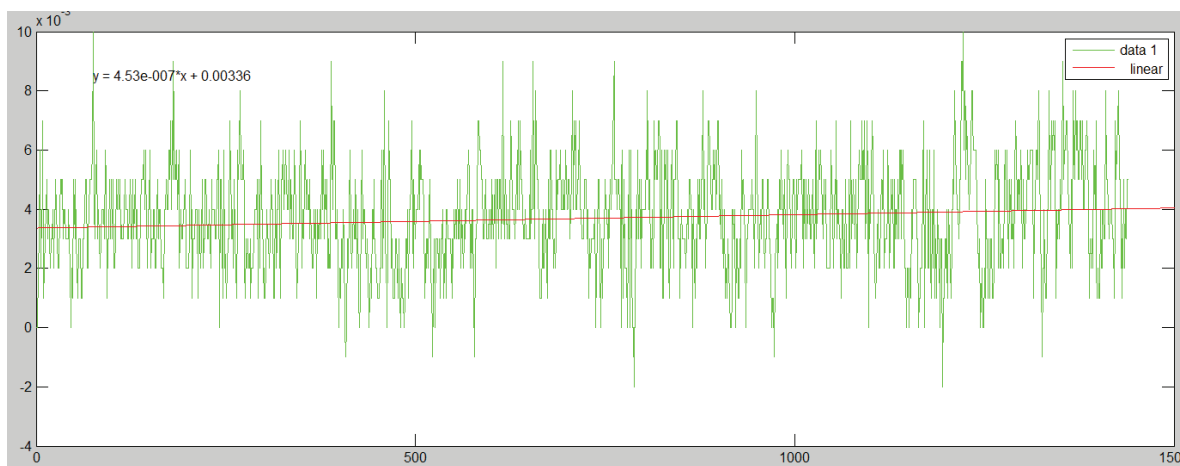


Abbildung 33: Linearer Trend am Beispiel der Eastwertre über 1440 Minuten (ein Tag) (eigene Darstellung)

Die oben aufgeführten Ergebnisse sind in dem Sinne als signifikant anzusehen, dass, auch aufgrund der hohen gewählten Freiheitsgrade und Standardabweichung, der großen Überbestimmung durch die hohe Anzahl an Beobachtungen, keine eindeutigen Trends bzw. Periodizitäten nachgewiesen werden konnten. Es konnte keine gesicherte Regelmäßigkeit bzw. Korrelation hergestellt werden, was den als zufällig erscheinenden Einfluss des Messrauschens auf die Ergebnisse betrifft, obwohl dieser dennoch permanent zu beobachten ist. Um ein optimales Ergebnis für einen Datensatz dieser Größe und Struktur zur Polynomregression und Abschätzung von Periodizitäten zu erzielen, wären Polynome sehr hoher Ordnungen zu verwenden. Jedoch kam es auch hier bei der Umsetzung in MATLAB zu Problemen, ab dem zehnten bzw. 15. Grad wurden Fehlermeldungen mit dem Hinweis, dass innere Matrixdimensionen würden nicht übereinstimmen, ausgegeben. Die Berechnungen abgebrochen. Obwohl die Dimensionen eindeutig überprüft wurden, konnte im verbliebenen Zeitrahmen keine kurzfristig überzeugende Lösung erzielt werden. Mit einem vom Erstbetreuer bereitgestellten Programm konnten u. a. Polynome b-ten Grades durch die Messwerte gelegt werden und diese anschließend vom entsprechenden Trend befreit werden. Zu Anschauungszwecken wurde dies für die Höhen eines Tages (16.10.) durchgeführt.

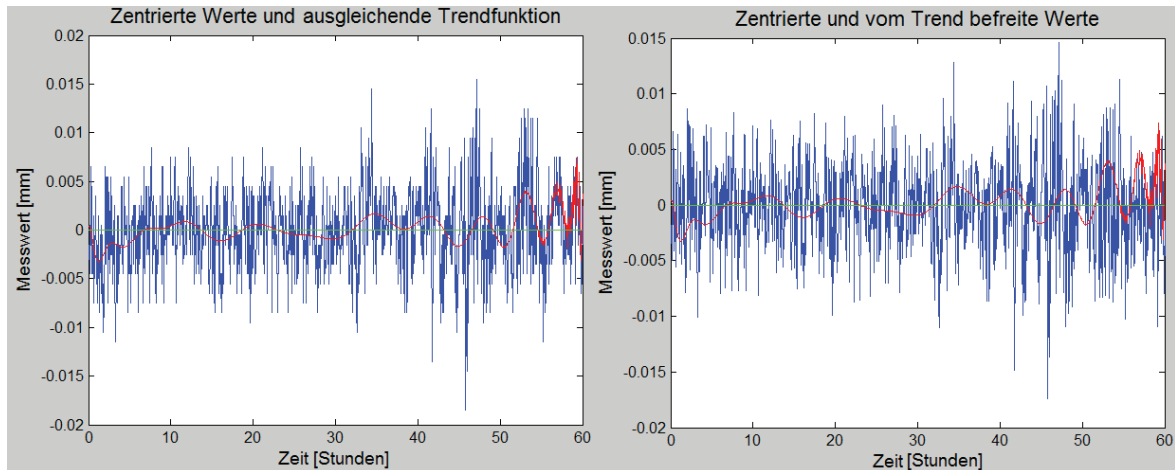


Abbildung 34: ausgleichende Trendfunktion 40. Grades und Verbesserungen über Zeit[h]/2,5 (eigene Darstellung)

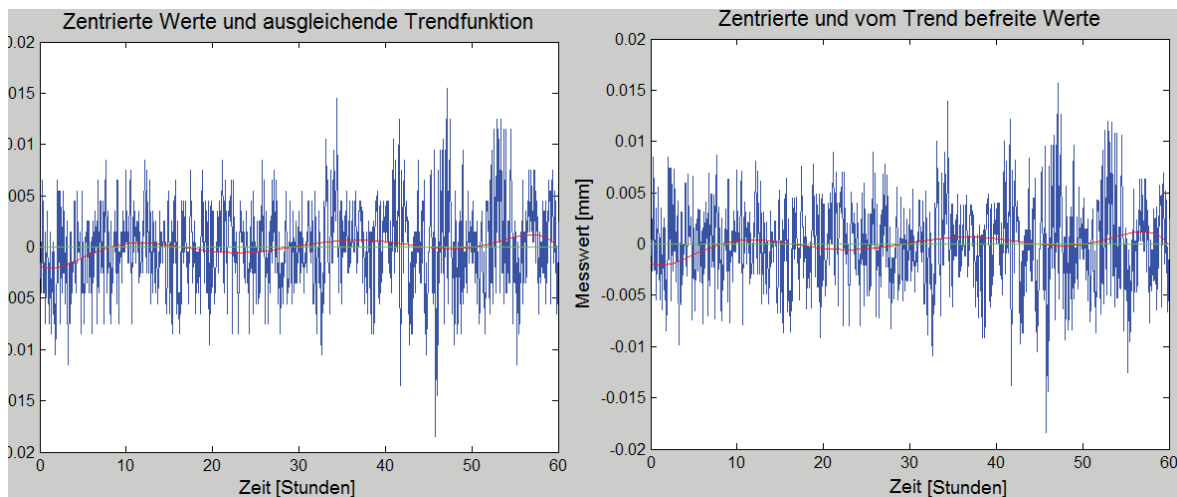


Abbildung 35: ausgleichende Trendfunktion 6. Grades und Verbesserungen über Zeit[h]/2,5 (eigene Darstellung)

Um Periodizitäten eindeutiger zu bestimmen bzw. abzuleiten, wurde dies auch für die Ergebnisse der Untersuchungen der Abschattungseinflüsse vollzogen, in der Hoffnung, dass diese kürzeren Messperioden weniger Schwankungen aufweisen.

4.3.2 Untersuchung von Verschiebungen

Der Kreuzschlitten wurde nach Norden ausgerichtet und die in Ostrichtung verlaufende Achse des Kreuzschlittens als Verschiebungsachse gewählt, um eine gute grafische Darstellung zu gewährleisten. In dem ersten Durchgang wurde siebenmal um jeweils einen Zentimeter verschoben in einem zeitlichen Abstand von 15 Minuten. Die sekundlichen Beobachtungen wurden gemittelt, indem die Messreihen einer Verschiebung anhand der Verschiebungszeitpunkte isoliert wurden. Dies entspricht einer Gesamtverschiebung von 7,0 cm und wie sich anhand folgender Tabelle erkennen lässt, weichen die Ergebnisse nur leicht, um 0,6 mm ab.

Tabelle 10: GMX902 GG - Verschiebungen um 1 cm

Verschiebung	East _{Mittel} [m]	North _{Mittel} [m]	Δ_M East [cm]	Δ_M North [cm]	Δ_M 2D [cm]
0	383744,9715	5935603,0098	0,00	0,00	0,00
1	383744,9636	5935603,0085	-0,79	-0,13	0,80
2	383744,9535	5935603,0094	-1,02	0,09	1,02
3	383744,9442	5935603,0090	-0,92	-0,04	0,93
4	383744,9342	5935603,0099	-1,00	0,09	1,00
5	383744,9252	5935603,0094	-0,91	-0,05	0,91
6	383744,9137	5935603,0107	-1,15	0,13	1,15
7	383744,9012	5935603,0111	-1,25	0,04	1,25
Summe			-7,03	0,13	7,06
Soll					7,00

Die gemittelten Absolutverschiebungen für 15 Minuten wichen dabei um bis zu rund 2,5 mm vom Sollwert ab. Grafisch sind die einzelnen Deformationen anhand des Ostwerts sehr gut zu erkennen, während beim Nordwert keine nennenswerten Besonderheiten zu beobachten waren:

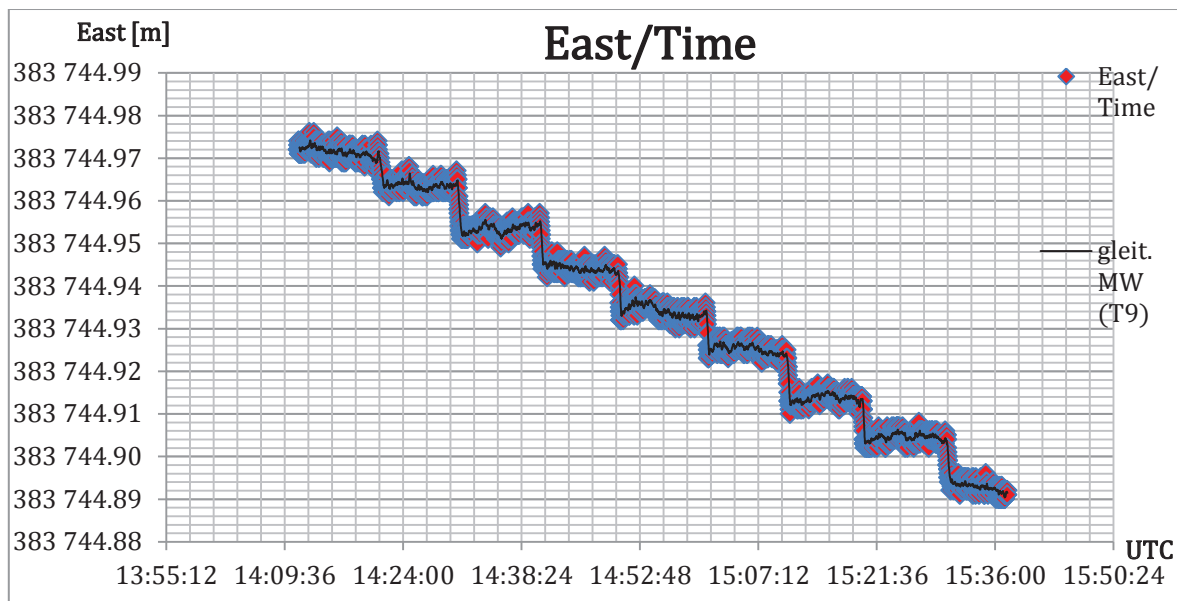


Abbildung 36: 1 cm-Verschiebungen East

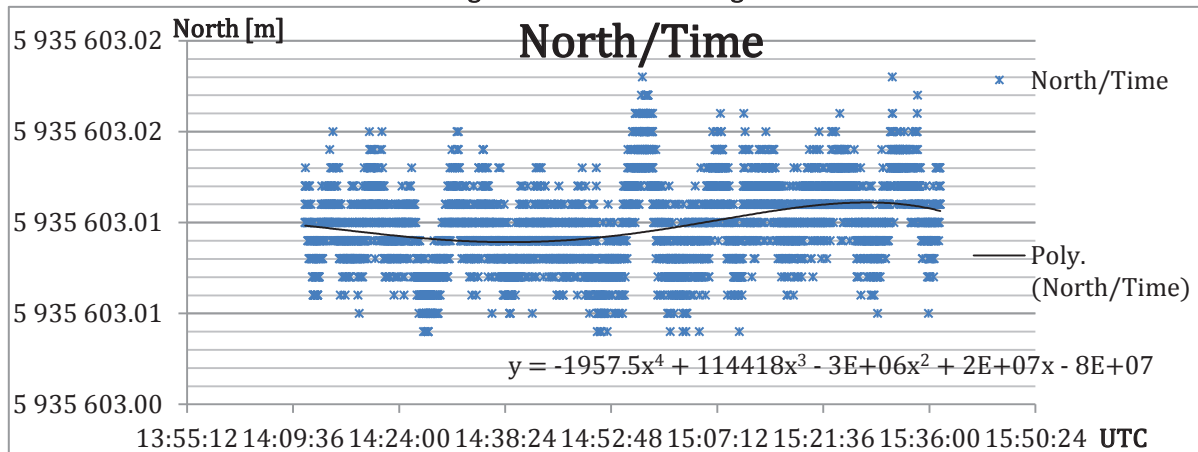


Abbildung 37: 1 cm-Verschiebungen North

Da die Verschiebungen gut zu erfassen waren, wurde im zweiten Durchlauf der Betrag auf 5 mm herabgesetzt. Hier war die Genauigkeit der Erfassung bei gleichen Zeitintervallen nicht ganz so hoch wie in der ersten Versuchsreihe. Das Endergebnis wich um 0,8 cm vom Sollwert ab.

Tabelle 11: GMX902 GG - Verschiebungen um 5 mm

Verschiebung	East _{Mittel} [m]	North _{Mittel} [m]	Δ_M East [cm]	Δ_M North [cm]	Δ_M 2D [cm]
0	383744,892	5935603,010	0,00	0,00	0,00
1	383744,900	5935603,013	0,84	0,30	0,90
2	383744,905	5935603,013	0,50	0,09	0,51
3	383744,910	5935603,014	0,53	0,05	0,53
4	383744,914	5935603,012	0,36	-0,22	0,42
5	383744,920	5935603,007	0,63	-0,43	0,76
6	383744,927	5935603,010	0,62	0,30	0,69
Summe			3,49	0,09	3,81
Soll					3,00

Wie in der vorangegangenen Messung weichen die Ergebnisse der Absolutverschiebungen um bis zu etwa 2,5 mm ab, jedoch fand sich in dieser Messung auch ein Mittelwert der sich um 4 mm vom Soll abhob. Auch sind hier im Ostwert die Übergänge zu erkennen, wobei diese weniger prägnant erscheinen. Der Nordwert ähnelt dem des vorangegangenen Durchgangs.

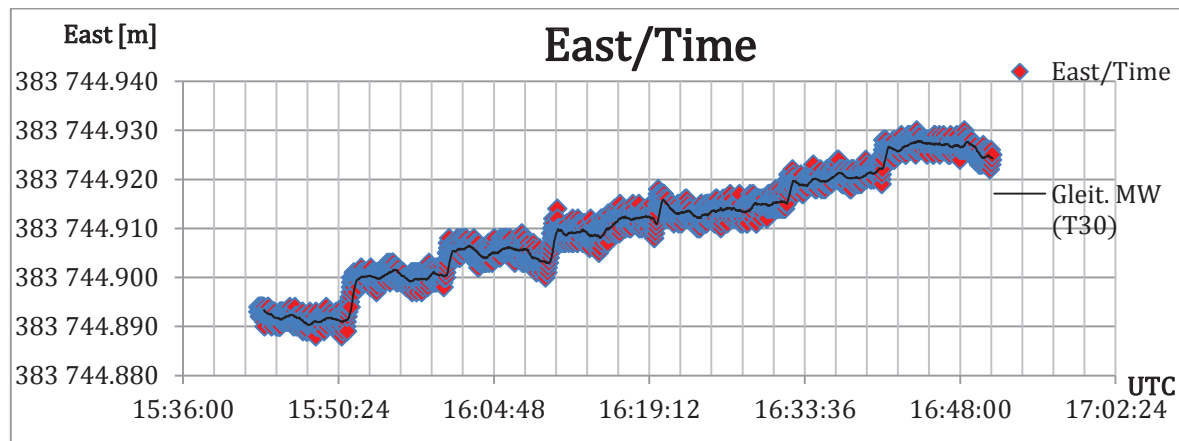


Abbildung 38: 5 mm-Verschiebungen East

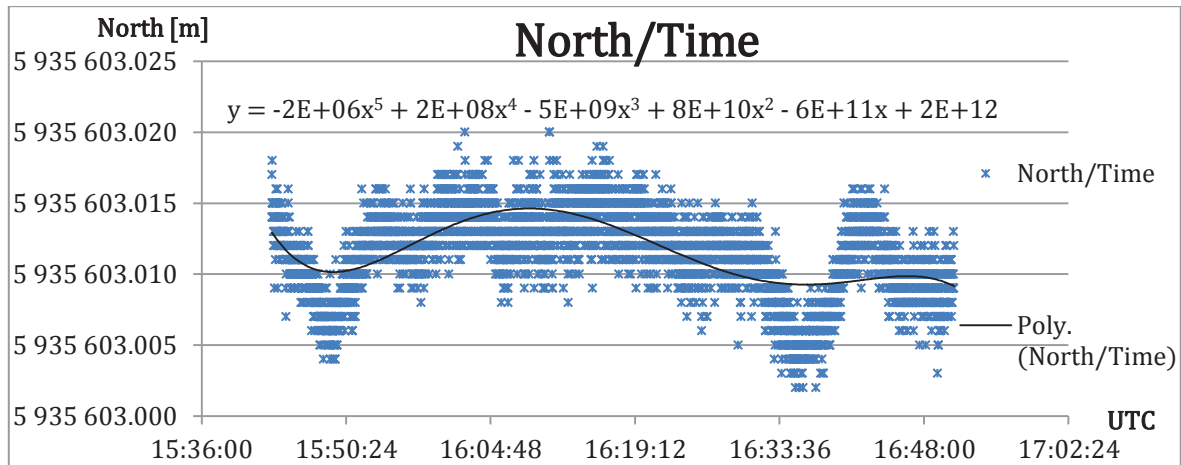


Abbildung 39: 5 mm-Verschiebungen North

4.3.3 Untersuchung von Höhenänderungen

Die Veränderung der Antennenhöhe konnte nicht in einer Richtung erfolgen, da das Kombinieren mehrerer Verlängerungen während des Umsetzens der Antenne zu viel Zeit in Anspruch und damit die Ergebnisse schwerwiegender beeinflusst hätte. Das System reagierte unverzüglich auf die Bewegungen des Empfängers, selbst die kurze Zeitspanne (von etwa fünf Sekunden), der es bedurfte um die Antenne mit der Verlängerung per Feststellschraube auf der Pfeilerplatte festzuziehen, was auch Einfluss auf die Höhe nahm, wurde registriert. Die damit verbundenen Höhenänderungen, lassen sich sowohl anhand der aufgezeichneten Höhenwerte, als auch in folgender Grafik zu Beginn und Abschluss jedes Höhenversatzes erkennen.

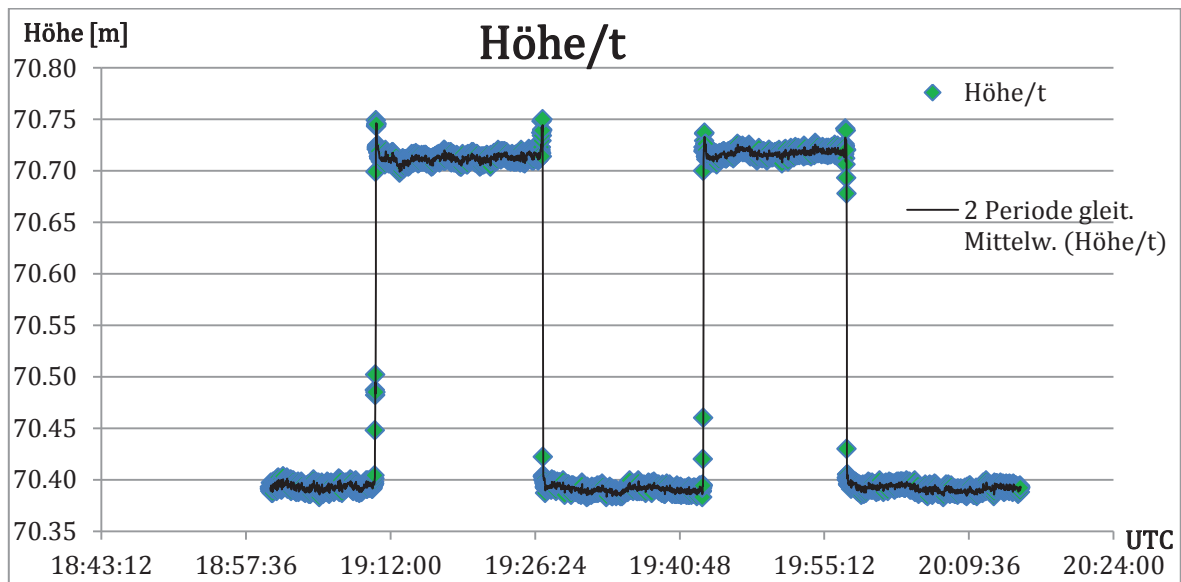


Abbildung 40: GMX902GG Höhenänderungen um 320 mm (eigene Darstellung)

Die gemittelten Höhenunterschiede wichen dabei um maximal 3,3 mm vom Sollwert (320 mm) ab. Die Differenz der Gesamtverschiebungen und des Sollwertes liegt bei 1,4 mm. Auffällig ist, dass die Fixed-Lösung trotz schnellerer Bewegungen des

Empfängers beibehalten wurde, und die Höhen konsequent in gleichbleibenden Genauigkeiten weiter beobachtet werden konnten.

Tabelle 12: Differenzen der Höhenänderungen

Verschiebung	Höhe _{Mittel} [m]	Δ_M Höhe [cm]
0	70,3932	0,00
1	70,7113	31,81
2	70,3910	-32,03
3	70,7143	32,33
4	70,3918	-32,25
Summe		-0,14
Soll		0,00

4.3.4 Untersuchung von Abschattungseinflüssen

Wie in der Durchführung beschrieben, wurde an die Ostseite des Pfeilers ein Holzbrett befestigt um eine teilweise und eine starke Abschattung zu simulieren. Mit SpiderQC wurden zunächst die Rohdaten der drei Messdurchgänge (ohne, teilweise, stark) im Qualitätscheck analysiert. Ausgewählte Ergebnisgrößen finden sich in folgender Tabelle wieder.

Tabelle 13: Qualitätsgrößen der Messungen (SpiderQC)

	Abschattung		
	keine	teilweise	starke
Vollständigkeit Epoche [%]	100	79,5	84,5
Datenlücken [min]	0	12,5	9,3
SNR L1	45,9	45,6	45,5
SNR L2	41,6	41,0	41,8
SNR max	50,4	50,9	50,9
SNR min	37,8	36,2	36,4
Verluste Phasenbeziehung	0	0	2
PDOP	3,2	3,5	3,1
GDOP	3,8	4,2	3,7
MP1 (Code) [m]	0,29	0,26	0,29
MP2 (Code) [m]	0,32	0,26	0,30

Die aussagekräftigsten Werte in Bezug auf die Untersuchung der Abschattungseinflüsse sind die der Datenvollständigkeit, der Datenlücken und der Phasenbeziehungsverluste. Unter teilweiser und starker Abschattung konnten für entsprechende Zeiträume nicht genügend Daten empfangen werden um eine genaue Positionslösung zu erreichen. Die restlichen (Mittel-) Werte mit Angaben zum Signalrauschverhältnis, Mehrwegeausbreitungen und Satellitengeometrie lassen keine eindeutige Beschreibung der Abschattungseinflüsse zu. So erscheinen die

Qualitätsmaße der Satellitengeometrie trotz starker Abschattung besser, als die der Messung ohne besondere Abschattungseinflüsse. Da die Messungen nicht parallel erfolgten und lediglich über einen Zeitraum von wenigstens 45 Minuten ausgeführt wurden, ist es möglich, dass der Grund dafür hier zu finden ist. Für genauere, den Rahmen der Arbeit überschreitende Betrachtungen müssten ggf. längere Messzeiten eingeplant werden, z. B. ein Tag.

Auch die ausgegebenen Grafiken lassen wenn, dann nur einen geringen Aufschluss zu. So ist den nachfolgenden Abbildungen noch einigermaßen zu entnehmen, dass das Verhältnis aus Signal und Messrauschen unter starker Abschattung etwas mehr gestreut war, als in der Messung ohne.

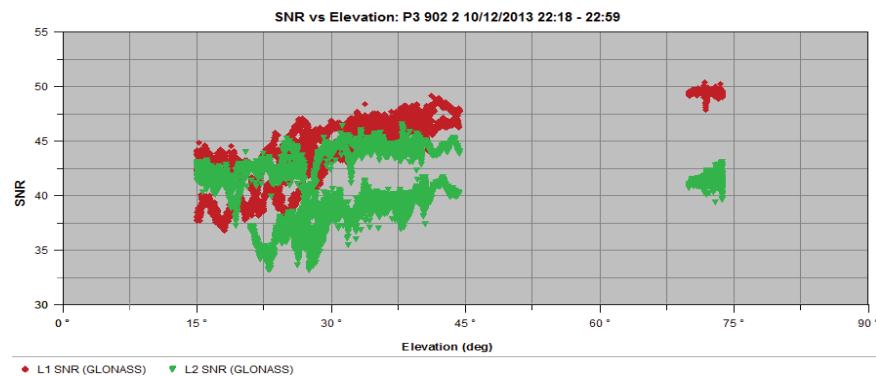
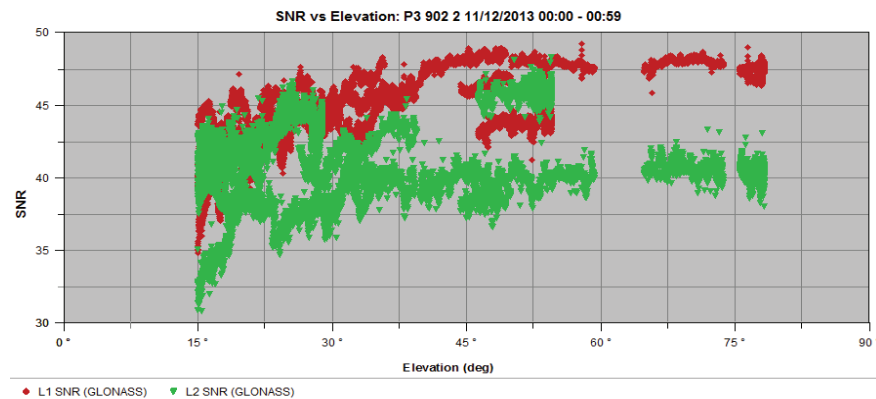


Abbildung 41: SNR über Elevation ohne und unter starken Abschattungseinflüsse(n) (eigene Darstellung)



Die Lücken in den Grafen besagen, dass unter entsprechender Elevation keine Satelliten in der entsprechenden Messung zur Verfügung standen, dies könnte ein weiteres Kriterium für die Wahl längerer Beobachtungsperioden sein.

Was aus den Graphen der Koordinatendifferenzen aus MATLAB und den LLQ-Dateien, jedoch nicht aus den Ergebnissen des QC Qualitätschecks hervorgeht ist, dass bei den Messungen ohne und unter teilweiser Abschattung ebenso Float-Lösungen auftraten.

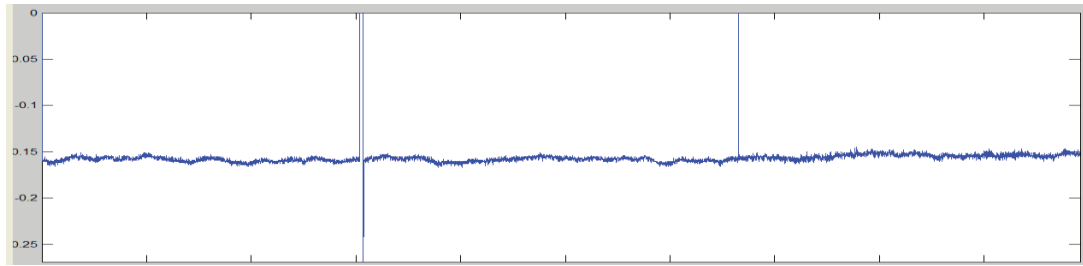


Abbildung 42: Koordinatendifferenzen der Northwerte [m] ohne (oben) und bei teilweiser Abschattung (unten) (eigene Darstellung)

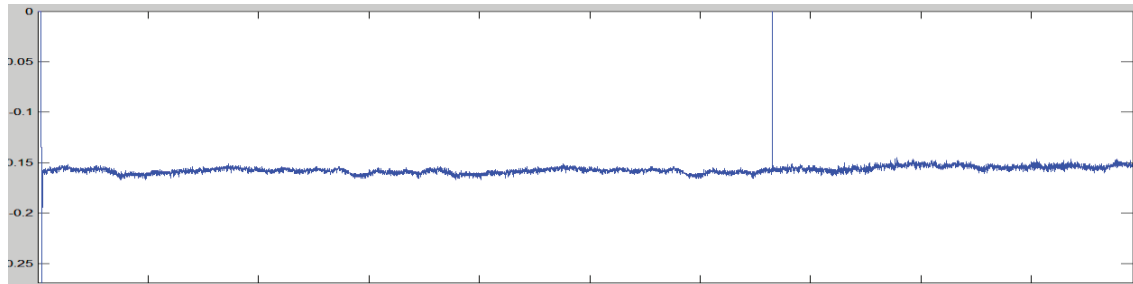


Tabelle 14: Ergebnisse Untersuchung Abschattungseinflüsse

	East _{Mittel} [m]	North _{Mittel} [m]	Höhe _{Mittel} [m]	σ_{East} [m]	σ_{North} [m]	$\sigma_{\text{Höhe}}$ [m]	Differenz zu Ergebnissen Langzeit		
							Δ_{East} [mm]	Δ_{North} [mm]	$\Delta_{\text{Höhe}}$ [mm]
ohne	383744,9467	5935603,0106	70,3849	0,0070	0,0069	0,0033	-1,4	-0,6	8,8
teilweise	383744,9473	5935603,0093	70,3860	0,0205	0,0158	0,0152	-2,0	0,6	7,7
stark	383744,9403	5935603,0063	70,3943	0,0072	0,0066	0,0033	4,9	3,7	0,6
gesamt	383744,9448	5935603,0087	70,3884	0,0140	0,0111	0,0104	0,4	1,3	5,3

Die erstaunlich gute Qualität der Ergebnisse der Messung mit starker Abschattung übertraf die Erwartungen. Während die Ergebnisse bei teilweiser Abschattung logischerweise höhere Standardabweichungen als die Werte ohne Abschattung aufwiesen, entsprachen die Größen unter starkem Einfluss etwa denen ohne Abschattungseinflüsse. Die Differenzen der Mittelwerte der einzelnen Messungen lagen bei bis zu ca. 7 mm in der Lage und 9 mm in der Höhe. Die erstaunliche Qualität der dritten Messung muss auf sehr günstige Satellitenkonstellationen, insbesondere in Bezug auf die errichtete „Signalbarriere“, zurückzuführen sein. Auch im Vergleich zu der aus der Langzeitmessung ermittelten Höhe erreichte der letzte Durchgang ein sehr gutes Ergebnis.

Da die Probleme in MATLAB weiter bestehen blieben, konnten nur grafische Annäherungsversuche an die Bestimmung der Periodizitäten unternommen werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Die Einflüsse des Signalrauschens erscheinen als zufällig und können abrupte Änderungen in den Positionsergebnissen innerhalb kleiner Intervalle verursachen. Es wurden jeweils die Ergebnisse der Northwerte geplottet und Ausgleichungen vorgenommen.

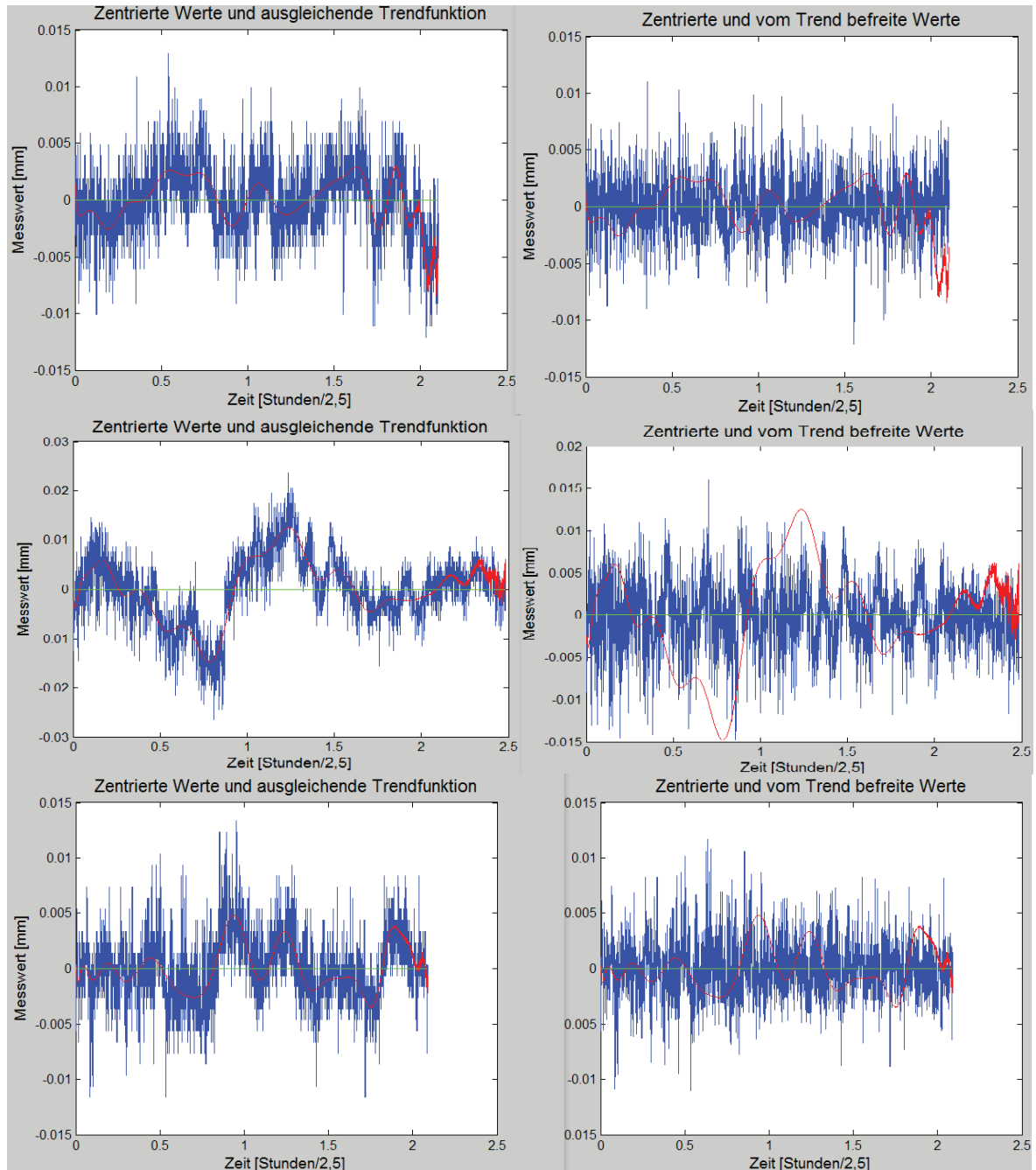


Abbildung 43: Reduzierte Northwerte ohne (oben), unter teilweiser (mittig) und unter starker Abschattung (unten), sowie angenäherte Polynomregression (40. Grades) (eigene Darstellung)

Weitere Auffälligkeit bei der Untersuchung der Abschattungseinflüsse war die Zunahme der Signalsprünge (insbesondere bei teilweiser Abschattung), sowie die Verlängerung der Initialisierungsphase. Bei starker Abschattung dauerte es 15 Sekunden, bis die Phasenmehrdeutigkeiten gelöst werden konnten, während dies bei allen anderen Messungen binnen weniger (bis zu fünf) Sekunden erfolgte.

4.4 Fazit und Ausblick

In den letzten Jahrzehnten haben Überwachungsmessungen und vollautomatische permanente Monitoringsysteme an Bedeutung gewonnen, die im Rahmen der Kontrolle von Gefährdungen durch Veränderungen und Verschiebungen an Objekten oder Landschaften auf der Grundlage von GNSS arbeiten. Die dabei zum Einsatz kommende eingesetzte Technik und Software hat vielfältige Entwicklungen erfahren und wird stetig weiterentwickelt und vervollkommen.

Neben den technischen Entwicklungen, die es ermöglichen, messtechnische Voraussetzungen, nicht zuletzt im Bereich der Satelliten und Empfänger, effektiver zu gestalten und dem konfliktfreien Zusammenspiel der unterschiedlichen Komponenten, bleibt weiterhin die Verringerung oder Reduzierung von Fehlerquellen, die den Messprozessen immanent eigen sind, ein wichtiges Thema.

Aus dieser Perspektive wurden im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch das hauptsächlich als Software für GNSS Referenzstationen und Netzwerken zum Einsatz kommende Leica GNSS Spider sowie die Analysesoftware Leica SpiderQC im Hinblick auf den Einsatz in Echtzeitmonitoringsystemen genauer betrachtet und analysiert.

Nachdem die entsprechenden organisatorisch-technischen Grundvoraussetzungen geschaffen und theoretisch abgesichert waren, wurden Langzeitmessungen mit unterschiedlichen Empfängern durchgeführt, die das System in Abhängigkeit von wirkenden Fehlereinflüssen auf erzielbare Genauigkeiten überprüften.

Die Länge der Basislinien der durchgeführten Messungen lag unter zehn Metern und entsprach somit nur einem Bruchteil, der in der Praxis verwendbaren Möglichkeiten. Dementsprechend beziehen sich auch die Genauigkeiten als exemplarisches Beispiel auf diesen „theoretisch-praktischen“ Fall.

Bei den simulierten Deformationen in Lage und Höhe wurde sichtbar, dass sich mit modernen Zweifrequenzempfängern und in Kombination von GPS und GLONASS längerfristige Verschiebungen und Höhenänderungen mit einer Genauigkeit von 3 – 4 mm nachweisen lassen.

Die Untersuchung der Langzeitkonstanz des Zweifrequenzempfängers ergab über mehrere Wochen und nach Mittelbildung, Koordinatenunsicherheiten in der Lage im Submillimeterbereich und in der Höhe von wenigen Millimetern. Beim verwendeten L1-Empfänger (nur GPS) lagen diese Werte im Zentimeterbereich.

Anhand den Untersuchungen und Ergebnissen der Abschattungseinflüsse lässt sich ableiten, dass sich bei stärkeren (einseitigen) Abschattungen die Positionsgenauigkeit im Vergleich zu einer Messung ohne besondere Abschattung in der Lage um bis zu einen halben bis ganzen Zentimeter und in der Höhe um bis zu einen Zentimeter verschlechtert hat. Je nach Messdauer und den zu dieser Zeit

herrschenden Satellitenkonstellationen, können die Ergebnisse auch positiver Ausfallen.

Während minimale Trends aus den Ergebnissen sichtbar wurden, erwies sich die Bestimmung der Periodizitäten als schwieriger. Die Ergebnisse insbesondere der Zweifrequenzempfänger über längere Zeiten erwiesen sich als sehr konstant bzw. stabil, während über kurze Perioden die Ergebnisse stark dem Einfluss des Signalrauschens unterlagen. Natürlich könnten theoretisch Teile der Koordinatenunterschiede auch durch wirkliche Deformationen hervorgerufen worden sein, aber da an den untersuchten Tagen keine sonderlichen Temperaturgänge oder sonstige Einwirkungen wahrgenommen wurden, können diese Einflüsse im aktuellen Fall ausgeschlossen werden.

Hier müssten die dargestellten Ansätze weiter verfolgt und erforscht werden, um verbindliche Aussagen bezüglich der Periodizitäten in Bezug auf die Empfänger bzw. das Signal treffen zu können.

Kurzfristig unterliegen die Beobachtungsergebnisse stark dem Einfluss des Signalrauschens. Die mittels Zweifrequenzempfänger bestimmten Positionen im Sekundentakt weisen Differenzen von mehreren Millimetern auf. Diese Größe ist durch Mittelbildung längerer Messungen zu eliminieren.

Mit Verwendung eines Referenzdienstes, wie z. B. Leica SmartNet, ließen sich die Genauigkeiten u. U. noch weiter steigern. Auch die Benutzung präziser Ephemeriden wie der durch den IGS zur Verfügung gestellten, könnte sich weiter positiv auf die Ergebnisse bzw. deren Genauigkeiten auswirken.

Mit Hilfe einer Alarmierungsfunktion eines Echtzeitanalyseprogramms wie z. B. SpiderQC, aber auch eines selbstentworfenen Programmes ist es möglich, entsprechende Warnungen bezüglich kritischer Schwellwertüberschreitungen der Echtzeitergebnisse Warnungen an die Nutzer auszusenden, um reaktive Maßnahmen einleiten zu können.

Dabei müsste u. a. über die Integration von Filtern nachgedacht werden, die auch den in den NMEA-Streams enthaltenen Roverstatus und in gewissem Maße die Dilution of Precision-Werte (GDOP, PDOP) berücksichtigen, um nicht auch bei einem u. U. auftretenden Phasenbeziehungsverlust Warnungen auszusenden zu lassen. Auch der Einfluss des Mess- bzw. Signalrauschens muss dabei berücksichtigt werden. In Bezug auf ein Echtzeitmonitoring- bzw. -auswerteprogramm könnte z. B. darüber nachgedacht werden, mittels Mittelbildung der zurückliegenden Messwerte und Beobachtung einer Anzahl aktueller Echtzeitwerte und anschließender Reduktion bzw. anschließendem Vergleichs, die Anzahl an Falschwarnungen des Systems zu minimieren.

An dieser Stelle soll auf den sogenannten Smoothingfilter verwiesen werden. Dieser ist in der Echtzeitprodukterzeugung in Spider einschaltbar, und erlaubt es die Beobachtungen über festgelegten Intervallen zu glätten, um o. g. Problemstellung zu minimieren. In dieser Arbeit wurde damit nicht weiter experimentiert, jedoch wäre dies für zukünftige Forschungen zu empfehlen, um erkennen zu können wie der Nutzen davon in der Praxis aussieht.

Bei einer Integrationslösung zum Monitoring stehen die (Echtzeit-)Streams im Vordergrund. Die Daten könnten, wie in Spider, in Verbindung mit einer sogenannten „Clean-up“-Funktion für festgelegte Zeiträume archiviert werden. Daten die ein bestimmtes Mindestalter überschreiten würden so automatisch gelöscht, bzw. ausgelagert (archiviert) werden. Damit wären zum einen, nachträgliche Betrachtungen der Deformationen möglich, zum anderen wäre das Problem der Datenmengen gelöst. Letztere sollten beim aktuellen Stand der Technik eine geringe Rolle spielen, zumal die Daten auch über einen Server ausgelagert werden könnten.

In diesem Fall erwies sich die von Leica in Spider definierte Obergrenze von einem Tag der Dateilänge als sehr sinnvoll. Ungefilterte Ergebnisse mehrerer Wochen in MATLAB zu plotten und rechnerisch zu analysieren würde auch mit modernen Computern sehr viel Zeit in Anspruch nehmen.

Dennoch kam es trotz Verwendung moderner Computer mehrfach Schwierigkeiten, die umfangreichen Datenmassen zu bearbeiten und auszuwerten. Diese Probleme hatten rechner- aber auch programmtechnische Gründe. Das Microsoft Programm Excel, das natürlich kein geodätisches Auswerteprogramm ist, soll hier nur am Rande erwähnt werden. Die Darstellung der Koordinaten (-differenzen) eines Tages mit einer sekundlichen Datenrate war aufgrund der hohen Anzahl an Werten nicht möglich, da sie eine programminterne Grenze (32000 Werte) überschritten. Ähnlich verhielt es sich bei MATLAB. Die grafische Ausgabe war zwar möglich, nahm aber für die Gesamtmessung inklusive Berechnung der Mittelwerte und Standardabweichungen gut zwei Drittel eines Tages in Anspruch. Bei der Ausgleichung der Beobachtungen eines Tages, kam es schließlich erneut zu Problemen, da Operationen mit n,n -Matrizen (86400, 86400) je Tag den dem Programm zur Verfügung stehenden rechnerunabhängigen Speicher bei weitem überschritt (um ca. 45 GB), und das Einbeziehen aller Messwerte nicht ermöglichte.

Die erzielten Genauigkeiten in Verbindung mit einem permanenten autonomen System lassen die Möglichkeit eines ähnlichen Projektaufbaus, wie in dieser Arbeit, als durchaus denkbar erscheinen. Natürlich hängt dies auch von den Genauigkeitsanforderungen des Projektes, sowie der Umgebung der zu überwachenden Punkte ab. Über das mobile Internet wären Fernbedienung und -wartung der Empfänger möglich, welche im Kostenfaktor einen klaren Vorteil gegenüber moderner Tachymeter erzielen. Auch die höheren Datenraten sprechen

für sich. Sollen diese jedoch, falls Bedarf daran besteht, im Nachhinein analysiert bzw. ausgewertet werden, müssen o. g. Fragestellungen bedacht werden.

Nicht alle Funktionen (vgl. 4.1.) des Programmes konnten innerhalb der Bearbeitungszeit untersucht werden. Dies hatte lizenztechnische, aber auch zeitliche Gründe. Einige Funktionen bzw. Optionen waren weiterhin auch nicht für die verwendeten Empfänger der GMX-Reihe verfügbar (u. a.: Leica MDB-Erzeugung, L2C-Tracking).

Das vom Hersteller zur Verfügung gestellte englischsprachige Benutzerhandbuch im Umfang von ca. 850 Seiten sowie die Programmhilfe enthalten alle relevanten Informationen, um einen Programmbetrieb unter unterschiedlichsten Einstellungen und Zielsetzungen zu ermöglichen. Allerdings ist es – wie bei Benutzerhandbüchern im IT-Bereich häufig der Fall, nicht sehr bedienerfreundlich aufgebaut.

Erfahrene Benutzer werden möglicher Weise nur wenig Schwierigkeiten haben, sich in die programminternen Funktionen und Oberflächen, die häufig miteinander verzahnt sind, bzw. interagieren, systematisch einzudenken.

Leider jedoch sind Benutzerhandbuch und Programmhilfe von Neueinsteigern weniger erfolgreich zu nutzen. Diese benötigen relativ viel Zeit, um sich, oft mit zusätzlicher Hilfe, einzuarbeiten. Manche Abschnitte sind mit unterschiedlichen Entscheidungsmöglichkeiten versehen, sodass eine hohe Konzentration erforderlich ist, um den Überblick nicht zu verlieren. Auch fehlt ein genau aufgeschlüsselter bedienerfreundlicher Index für die Suche im Detail, so dass es teilweise notwendig sein kann, mehrere Kapitel durchzusehen, bis der benötigte Hinweis gefunden ist.

Aus diesem Grunde und um zukünftig Forschenden und Studierenden und möglicherweise auch weiteren Personenkreisen den Einstieg zu erleichtern, wurde auf der Grundlage von eigenen Erfahrungen im Rahmen der Arbeit für das Thema eine Kurzanleitung erstellt, die alle notwendigen Schritte auch für Neueinsteiger in logischer Reihenfolge beschreibt (s. Anhang: *Leica Spider – Kurzanleitung zur Durchführung von Echtzeitmessungen mit GNSS*). Dabei wurde versucht, oben beschriebene Schwierigkeiten auszuräumen.

Es ist vorstellbar, dass die Kurzanleitung bei erfolgreichem Einsatz in der Praxis ggf. in modifizierter Form oder mit Zusätzen versehen, breiteren Benutzerkreisen zugeführt werden kann.

Um die oft spezifischen und anspruchsvollen Aufgaben von Überwachungssystemen lösen zu können, ist es allerdings weiterhin notwendig Fehlerquellen zu verringern oder zu kompensieren. Die im vorliegenden Experiment gewählten Lösungsansätze wurden in der Arbeit auf der Grundlage theoretischer Zusammenhänge beschrieben und sollten weiter verfolgt werden.

Anhang

Anhang I: Aufgabenstellung der Arbeit



GNSS-basierte Überwachungsmessungen mit dem Leica-Spider-System

Aufgabenstellung

Permanente vollautomatische Monitoringsysteme gewinnen im Bereich der Überwachungsmessungen mehr und mehr an Bedeutung. Als Sensoren eignen sich natürlich moderne GNSS-Sensoren. Eine Software zur Vernetzung von Sensoren und zur Echtzeitberechnung von Koordinaten aus hochpräzisen differentiellen GNSS-Messungen steht mit dem System Spider von Leica zur Verfügung.

Der Kandidat hat im Rahmen seiner Bachelorarbeit die Aufgabe, das System Leica Spider zu untersuchen. Es sind von ihm praktisch durchgeführte Messungen auszuwerten und vergleichend zu betrachten. In erster Linie gilt es, die erreichten Genauigkeiten der von ihm bestimmten Verschiebungen (Lage-, Höhen- und 3D-Komponente) zu ermitteln und zu bewerten sowie das System auf Abschattungseinflüsse und seine Langzeitkonstanz zu testen. Zur Auswertung sind die Daten des Spider-Systems in das Matlab- bzw. Octave-Datenformat zu konvertieren, dort graphisch auszugeben und im Rahmen der Auswertung auf Trends und Periodizitäten zu untersuchen.

Als ein Teil der Aufgabenstellung sind alle Arbeitsschritte vom Aufbau des Systems bis zur Datenübernahme in Matlab in Form einer Kurzanleitung für Studierende nachvollziehbar darzustellen.

Neubrandenburg, 17. Juli 2013

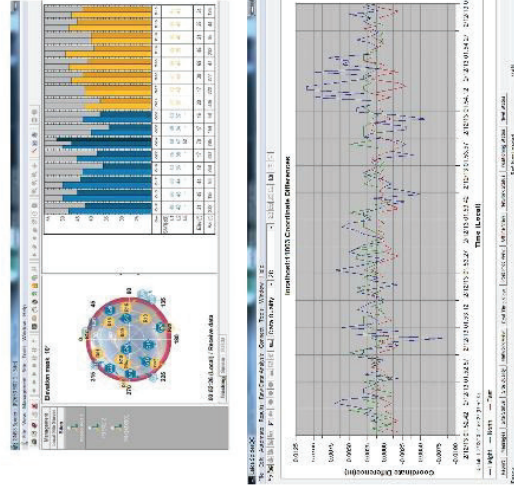
*Prof. Dr.-Ing. Karl Foppe
Prof. Dr.-Ing. Elfriede Knickmeyer*

Anhang II: Anleitung für Studierende

Leica GNSS Spider



Kurzanleitung zur Durchführung von Echtzeitüberwachungsmessungen mit GNSS (GPS und GLONASS)



Inhalt

1. Überblick und Funktionen Leica GNSS Spider.....	3
2. Installationshinweise und Lizenzmanagement.....	5
3. Praktische Messanordnung.....	7
3.1 GMX902GG Aufbau	8
3.2 GMX901 Aufbau	9
4. Konfiguration der Sensoren in Spider.....	11
5. Durchführung der Messung.....	17
6. Datenübernahme	22
6.1 MATLAB	22
6.2 Leica SpiderQC.....	24
Anhang.....	26

Die in dieser Anleitung verwendeten Screenshots bilden zu Veranschaulichungszwecken Nutzoberflächen von Programmen der Firmen Leica Geosystems AG und Microsoft Corporation ab. Soweit dies nicht durch eine entsprechende Quellenangabe kenntlich gemacht ist, stammen die Grafiken und Bildquellen vom Verfasser dieser Anleitung.

1. Überblick und Funktionen Leica GNSS Spider

GNSS Spider ist eine integrierte Softwarelösung zum zentralen Betrieb von GNSS-Referenzstationen und -Netzen.

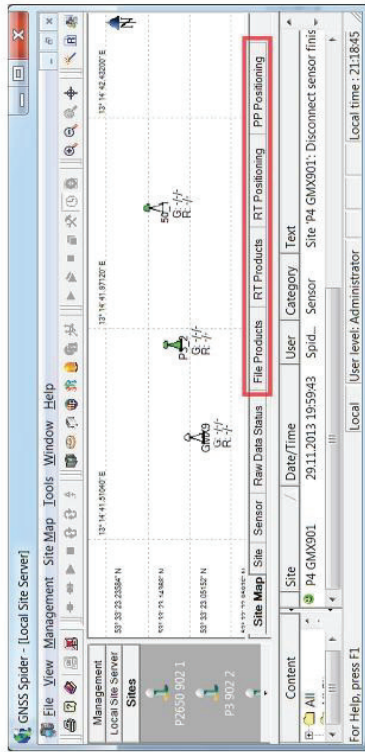
Innerhalb des Systems von Leica GNSS Spider (im nachfolgenden Text wird stattdessen die Kurzform Spider verwendet) können anfangs zwei verschiedene Servertypen für alle weiteren Arbeiten konfiguriert werden:

- **Site Server:** Selbständiges Modul, welches die direkte Kommunikation herstellt und Einstellungen der Empfangsanlagen (engl. Site) verarbeitet und diese bei der Aufzeichnung von Rohdaten und dem Erzeugen von Echtzeitpositionsdaten innerhalb eines Netzwerks berücksichtigt
- **Network Server:** Herstellung einer Verbindung zwischen Site Server, Cluster Server und RTK Proxy Server; Voraussetzung für die Bereitstellung von Netzwerk-RTK-Korrekturdaten und die Verwaltung der Rovernutzer innerhalb des Netzwerks

Unter der Voraussetzung, dass entsprechende Lizenzen vorhanden sind, lassen sich mit diesen beiden Modulen in Spider folgende Aufgaben für einzelne GNSS-Stationen und Stationsnetzwerke bewältigen:

- o Konfiguration und Steuerung lokaler (unbeaufsichtigter) GNSS-Empfänger,
- o Regelmäßige Downloads der Daten von angebundenen Empfängern,
- o Aufzeichnen (Loggen) von Rohdaten(-streams),
- o Datenspeicherung und -distribution,
- o Qualitätskontrolle der Daten,
- o fortlaufende Positionsberechnungen in Echtzeit,
- o kontinuierliche Netzwerkberechnungen in Echtzeit,
- o Verwaltung und Bereitstellung von
 - RTK- und DGNSS-Diensten für einzelne Empfänger
 - Netzwerk-RTK-Diensten für Empfänger eines Gebietes,
- o Verwaltung, Kontrolle und Loggen der Roverzugriffe in Echtzeit.

Für diese Aufgaben stehen innerhalb der gewählten Serverumgebung in Spider wiederum mehrere Menüs in Form von Tabs (Reitern) zur Verfügung. Darunter befinden sich unter anderem „File Products“, „RT Products“, „RT Positioning“ sowie „PP Positioning“.



- **File Product:** Speicherung von GNSS Rohdaten im RINEX-Format, (möglicher Inhalt: GLONASS-, Observations- und Navigationsdatei; ebenso Messungen von meteorologischen Sensoren und Neigungsmessern sowie Option zur Ausgabe eines Spider-eigenen „Quality control reports“). Optional besteht darüber hinaus die Möglichkeit, die Daten aller Empfänger auch im binären Leica-internen MDB-Format und das Ereignisprotokoll (Event log) von Spider speichern.
- **RT Product:** Bereitstellung von Korrekturdaten für RTK-Netze (MAC, VRS, FKP) und einzelne Empfänger in RTCM 2.x und 3.x, und Leica-Empfänger-eigenen Formaten, die sich zum Beispiel via Funk oder Internet an die Nutzer in Echtzeit (RT – „Real Time“) aussenden lassen.
- **RT Positioning:** Berechnung und Bereitstellung von Empfängerkoordinaten in Echtzeit; Bestimmung der Positionen erfolgt aus Basislinien zwischen einer Referenz und einem Rover. Diese werden in einer Datei zu gewählten Intervallen kontinuierlich als Zeile angehängt („Streamdatei“) und im NMEA-Format gespeichert. Diese Datei kann (auch in Echtzeit) in ein entsprechendes Monitoring-Programm (z. B. GeoMoS) zur Analyse weitergeleitet werden.
- **PP Positioning:** Berechnung und Bereitstellen von Empfängerpositionen im Postprocessing; Positionen werden unter Anwendung troposphärischer und ionosphärischer Korrekturmodelle aus Basislinien berechnet und im NMEA-Format gespeichert.

2. Installationshinweise und Lizenzmanagement

Alle für die Installation wichtigen Daten sind auf der Leica NRS Software DVD enthalten. Unter „...Documentation\Leica_GNSS_Spider“ ist auch eine ausführliche Installationsanweisung zu finden, welche bei auftretenden Problemen genutzt werden sollte, insofern diese nicht in folgendem Abschnitt geklärt werden.

Die Ausführung der Spider Setup.exe kann nur als Systemadministrator erfolgen. Besonders bei älteren Windowsversionen sollte auch darauf geachtet werden, dass die aktuellsten Service Packs installiert sind, generell unterstützt Spider 32- und 64-bit-Versionen.

Vor der eigentlichen Installation wird das System auf aktuelle Versionen des Microsoft® SQL™ Native Clients, .NET Framework und ggf. Microsoft IIS geprüft. Bei Bedarf sollten diese automatisch installiert bzw. aktualisiert werden. Kommt es dennoch zu einer entsprechenden Fehlermeldung, sind betreffende Komponenten vor erneuter Ausführung der Installationsdatei manuell zu installieren, auch diese sind auf der DVD unter „...Software\Support“ zu finden.

Für die Nutzung auf einem Computer kann dann mit der „Site Server Installation“ fortgefahren werden (installiert werden dabei Module zum Konfigurieren und Steuern der Empfänger, zum Speichern sowie Bereitstellen von Roh- und RTK-Positionierungsdaten. Für den Betrieb in kleinen Netzwerken wird die „Full GNSS Spider Installation“ empfohlen.

Bei Abschluss wird zur Freischaltung der Customer Care Package (CCP) Lizenzschlüssel benötigt. Dieser unterscheidet sich für jeden verwendeten Dongle.

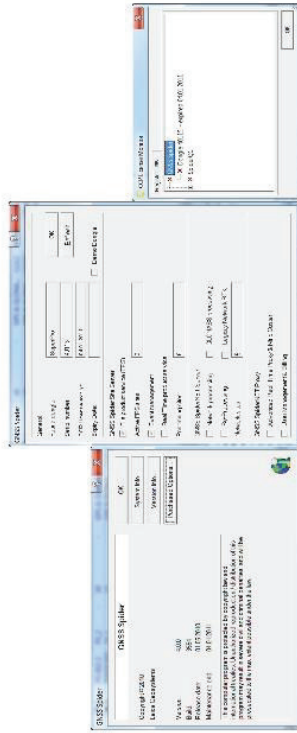
Um anschließend alle erworbenen Funktionen in Spider nutzen zu können, sind außerdem die Treiber für die USB-Dongles zu installieren. Während dies nach Anschluss bei neueren Betriebssystemen automatisch über Internet erfolgen kann, sind die Treiber ggf. auch im DVD-Verzeichnis „...Software\DongleDriver761“ zu finden.

Die Eigenschaften der Lizenz sind unter Eingabe der eigenen IP mit dem CCP-Lizenz-Port (normalerweise 6002) im Browser einzusehen (z. B. <http://123.45.67.890:6002/>). In den Fällen, in denen wie bei der bereits vorhandenen Belegung von Port 6002 dennoch ein anderer Port in Verwendung ist, lässt sich der Port über den cmd-Befehl `netstat -ano` durch Vergleich der PIDs der `spnrvnt.exe` im Windows-Taskmanager ermitteln.

Entsprechende Meldungen sollten im Ereignisbereich einen Erfolg bekunden.

Site	Date/Time	User	Category	Text
Site Map	30.11.2013 20:00:02	Spider	Site Server	Cleanup files.
Site Map	30.11.2013 20:00:02	Spider	Site Server	Cleanup files started.
Site Map	30.11.2013 20:16:02	Spider	General	Spider dongle serial no. 40115 found.
Site Map	30.11.2013 20:16:02	Spider	General	Valid CCP License found for dongle 40115. Expiry date: 04.01.2011.
Site Map	30.11.2013 20:16:51	Spider	General	Site P3 902 2 Connect.
Site Map	30.11.2013 20:16:51	Spider	General	Site P3 902 2: Sensor connect started.

Zu beachten ist auch, dass das Veröffentlichungsdatum der Spiderversion („Release“) – einzusehen unter **Help** → **About...** – älter sein muss, als das Ablaufdatum der Lizenz (→ **Purchased Options** oder **Help** → **CCP License Monitor** → **Info** → **GNSS Spider**).



Spider nutzt je nach Umfang des Betriebes auch Ports, die während der Installation freigegeben sein müssen. Bei der Installation mit aktiver Windows XP Firewall erfolgen die Einstellungen in der Regel automatisch. In gegenteiligen Fällen müssen die einzelnen Ports manuell freigeschaltet werden (Vgl.: GNSS_Spider_installationGuide.pdf für die Auflistung der Ports, S. 20). Bei der Installation der Site Server Version auf Windows 7x64 im Testbetrieb gelang dies ohne Umstellung und ohne Einschränkung der Funktionalität.

Für spezifischere Fehlersuchen während der Installation geben die Seiten 41 ff. des Installations-Guides Auskunft.

Beim Start von Leica GNSS Spider kann es häufig zu dem Hinweis kommen, dass neuere Versionen zum Update bereitstehen. Dabei sollten stets die Daten der CCP-Lizenz sowie des Versionsreleases berücksichtigt werden. Nach einem Update kann die Lizenz ungültig und die erworbenen Funktionen unter der neueren Version ggf. nicht mehr genutzt werden.

Der lizenzierte Dongle muss für die gesamte Arbeitszeit mit dem PC verbunden sein.

Weiterhin ist die korrekte Installation der USB-Seriell-Adapter-Treiber von großer Bedeutung, insbesondere bei Windows 7 64-bit traten einige Schwierigkeiten auf (Genaueres dazu unter Punkt 4).

Bei Verwendung von Leica SpiderQC erfolgt die Lizenzierung sowie der Donglebetrieb wie bei GNSS Spider.

3. Praktische Messanordnung

Je nach Aufgabenstellung und Laufzeit der Messung kann der praktische Messaufbau (u.a. Standpunktwahl, Befestigung) variieren. Dieses Beispiel zeigt exemplarisch die bei einer Langzeitmessung angewandte Messordnung. Dabei wurden die Messpfähle auf dem Dach des Hochschulgebäudes 2 als Empfängerstandpunkte gewählt. Die anliegende Geodätische Beobachtungsstation wurde als Standort für PC und GNSS-Receiver gewählt.

Für die Durchführung einer GNSS-Überwachungsmessung mit Spider kann folgendes Equipment o.ä. zur Verfügung stehen:

- PC/Laptop mit der Leica GNSS Spider Software und aktivierter Lizenz,
- zwei (analoge) Leica AS10 Antennen und zwei GMX902GG Receiver,
- eine GMX901 Antenne mit integriertem Receiver,
- die dazugehörigen Kabel!

HINWEISE:

Die Verwendung der richtigen Kabel ist Grundvoraussetzung für einen reibungslosen Messablauf – Darüber hinaus ist unbedingt zu beachten, dass bei Falschenutzung die Gefahr eines Kurzschlusses und der Beschädigung der Technik besteht!

Vor dem Anschließen ist sicherzugehen, dass die Anzahl der Pole zwischen den Steckverbindungen übereinstimmt; Bei Leica-Steckverbindungen sind Markierungen (zumeist in Form roter Punkte) auf den Steckern zu finden, diese sind beim Verbinden aneinander auszurichten.



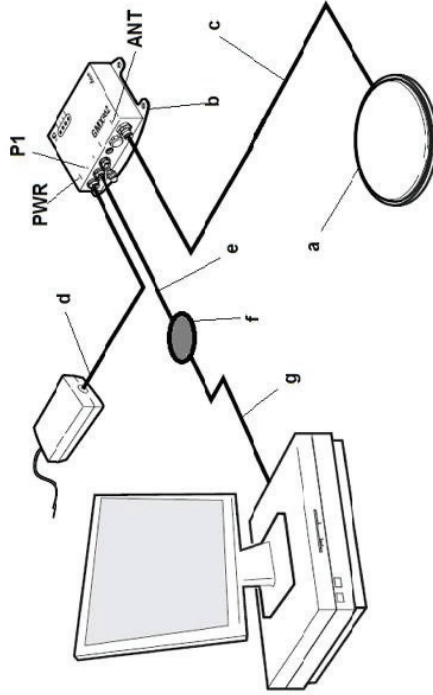
Besonders bei Langzeitmessungen sind unbedingt Vorkehrungen gegen meteorologische Einflüsse zu treffen. Steckverbindungen sind entsprechend zu isolieren und vor Feuchtigkeit zu schützen. Die Kabel selbst sollten sicher verlegt werden, um Unfallgefahr zu vermeiden.

Da sich die o.g. Empfänger unterscheiden, wird ihr Aufbau separat beschrieben.

Dabei wird bei den Kabeln die Leica-spezifische Typenbezeichnung angegeben. Diese sechsstellige Nummer ist auf den Kabeln selbst, meist in Nähe der Anschlüsse zu finden.

3.1 GMX902GG Aufbau

Mit dem GMX902GG (Zweifrequenzempfänger) und der AS10-Antenne lassen sich Beobachtungen zu GPS- und GLONASS-Satelliten durchführen.



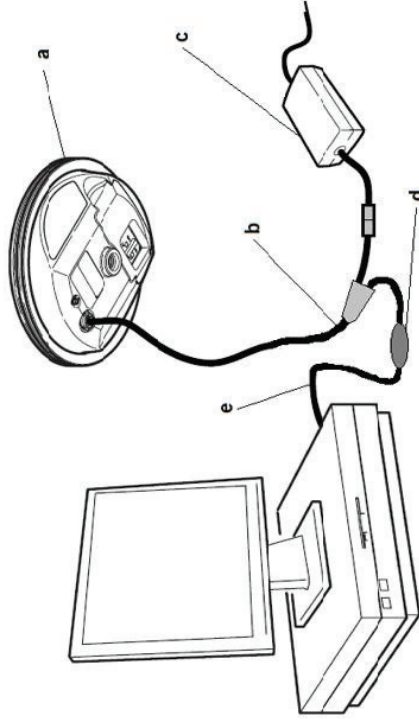
Quelle: GNSS_Spider_User_Guide_v4.0.pdf (Leica Geosystems, 2010)

- a – AS10
- b – GMX902GG
- c – Antennenkabel (z. B. 30 m) 632 390
- d – Stromversorgung 722 409
- e – Datenübertragungskabel 8-polig (m) und Seriell 741 947
- f – USB-Seriell-Adapter
- g – USB-Verlängerung (bei Bedarf)

Aufgrund der ausreichenden Länge des Antennenkabels konnte dieses direkt durch eine dafür vorgesehene Wandöffnung in die Geodätische Beobachtungsstation gelegt werden, es waren keine Isolierarbeiten zur Abdichtung von Steckverbindungen nötig.

3.2 GMX901 Aufbau

Die GMX901-Antenne besitzt bereits einen integrierten GNSS-(Einfrequenz-) Empfänger. Aus diesem Grund wird kein zusätzliches Antennenkabel benötigt. Mit ihr lassen sich lediglich GPS-Satelliten beobachten.



Quelle: GNSS_Spider_User_Guide_v4.0.pdf (Leica Geosystems, 2010)

a – GMX901

b – Y-Antennenkabel mit Strom- und Seriellanschluss 743 389

c – Stromversorgung 722 409

d – USB-Seriell-Adapter

e – USB-Verlängerung (bei Bedarf)

Um die Entfernung zur Beobachtungsstation zu überbrücken, kamen weiterhin Strom- und Seriellverlängerungskabel zum Einsatz. An den Verbindungsstellen mussten entsprechende Schutzvorkehrungen getroffen werden.

Die Antennen konnten nicht ohne weiteres auf die Bodenplatte der Messpfiler geschraubt werden, da durch den geringen Abstand das Anstecken der Antennen- bzw. Datenkabel nicht möglich gewesen wäre. Dafür kamen speziell gefertigte Adapter zum Einsatz, die in einem Höhenoffset von 100 mm resultieren.



4. Konfiguration der Sensoren in Spider

Bevor die Arbeit mit Spider begonnen wird, sollte sichergestellt werden, dass die Treiber der USB-Seriell-Adapter installiert sind. Dazu reicht es die einzelnen Adapter nacheinander an die USB-Ports anzuschließen und auf die Reaktion im Gerätemanager zu warten. Werden sie erkannt, ist dies ein gutes Zeichen. Sollten beim Verbinden mit Spider jedoch Fehlermeldungen wie „Could not connect“ oder „Device not found“ auftreten, ist möglicherweise ein Treiberkonflikt aufgetreten. Zu Beginn der Langzeitmessung wurde festgestellt, dass auf Windows 7 x64 lediglich Adapter mit FTDI-Chipsatz (z. B. Digius) erkannt wurden, während auf Windows XP x86 nur die Adapter des anderen großen Herstellers Prolific einwandfrei funktionierten und auch in Spider angenommen wurden. Ob dies an der Installationsreihenfolge der Adapter oder am verwendeten Betriebssystem lag, ließ sich nicht zweifelsfrei feststellen. Zu empfehlen ist generell der Einsatz chipsatzgleicher USB-Seriell-Adapter.

Nach dem Öffnen von Leica GNSS Spider ist zunächst eine Serverumgebung zu erstellen.

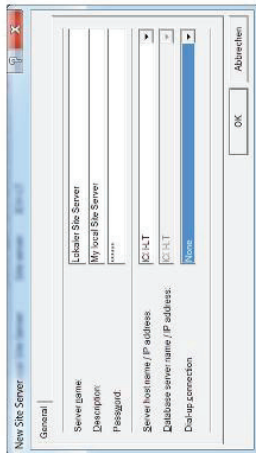
Dazu erfolgt die Öffnung über: **Menüleiste → Management → Server Management** (alternativ auch über den linksseitig angeordneten Navigationsbereich).

Die Menüleiste zwischen **Management** und **Tools** ist dynamisch, d.h. dass der dazwischenliegende Button und die darunter befindlichen Optionen sich, entsprechend des Bereiches verändert, in welchem gerade in Spider navigiert wird.

Im Anschluss lässt sich über **Server** oder Rechtsklick im Servermanagementfenster ein **neuer Site Server** erstellen.



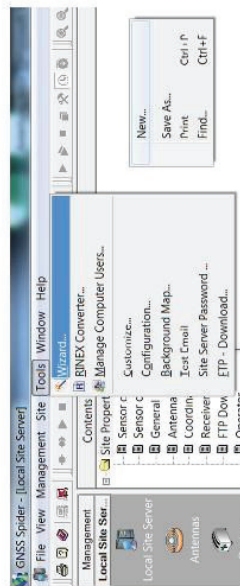
Die zu treffenden Eingaben lassen sich anhand nachfolgenden Screenshots erklären. Als **Server host name** kann der PC- bzw. Benutzername gewählt werden. Für den Fall, dass später Daten direkt von Spider an GeoMoS oder SpiderQC gesendet werden sollen, muss das Passwort notiert werden!



Geöffnet wird der Site Server mit Doppelklick. Anschließend ist es möglich, über **Management → Operator Management → New...** Firmen- und Benutzerangaben hinzuzufügen. Dies ist jedoch nicht zwingend notwendig.

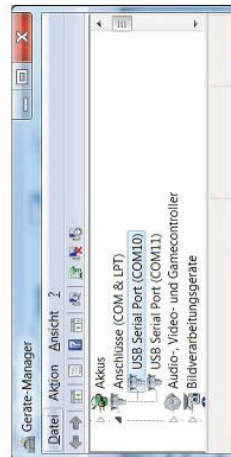
Im **Local Site Server** lassen sich nun unter dem Tab **Site** die einzelnen Empfänger konfigurieren und hinzufügen.

Über Rechtsklick im **Site**-Bereich → **New...** lässt sich das Konfigurationsmenü öffnen, alternativ gibt es auch einen sogenannten Wizard, der durch die Konfiguration führt.



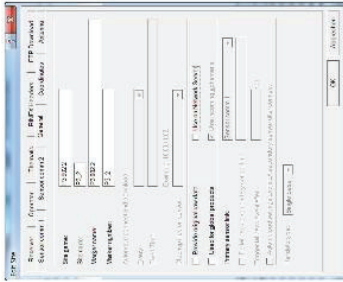
Unter **Sensor Comm 1** werden nachfolgend die Kommunikationseinstellungen getätigt. Dafür wird zuerst der verwendete Sensortyp (GMX901/GMX902) und anschließend der COM-Port ausgewählt (Achtung: Sensor muss über USB-Seriell-Adapter verbunden sein).

Um bei mehreren Adaptern den Überblick zu behalten, kann vor dem Anschließen an den PC der Gerätemanager geöffnet werden. Dort erscheint dann der neu verbundene Adapter mitsamt COM-Portnummer.

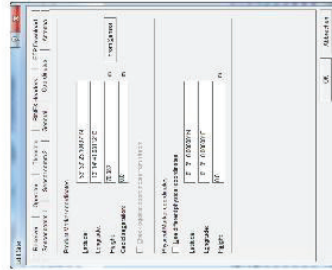


- **Used for Global Products:** u. a. Erleichterung des Erzeugens und Speicherns von RINEX-Daten; damit werden Einstellungen für mehrere Empfänger (Sites) übernommen, sodass alle die gleichen Einstellungen verwenden.
- **Use Incoming Ephemeris:** Möglichkeit die Nutzung von Ephemeriden auszuschalten, damit diese nicht Daten einer anderen Quelle beeinflussen.

Für den Zweck dieser Demonstration genügt die Aktivierung von **Use incoming Ephemeris**.



Unter **Coordinates** sind die Näherungskordinaten (geodätische Länge und Breite) sowie die Höhe anzugeben. Mit Höhe ist die orthometrische Höhe gemeint, möglich ist jedoch auch, die ellipsoidische Höhe einzutragen. Falls letzteres der Fall ist, muss auch die Geoidundulation (**Geoid separation**) eingegeben werden, da normalerweise im NMEA-Format die orthometrische Höhe ausgegeben wird. Belässt man die Undulation bei 0,0 m, so wird die lokale ellipsoidische Höhe in die NMEA-Dateien exportiert.



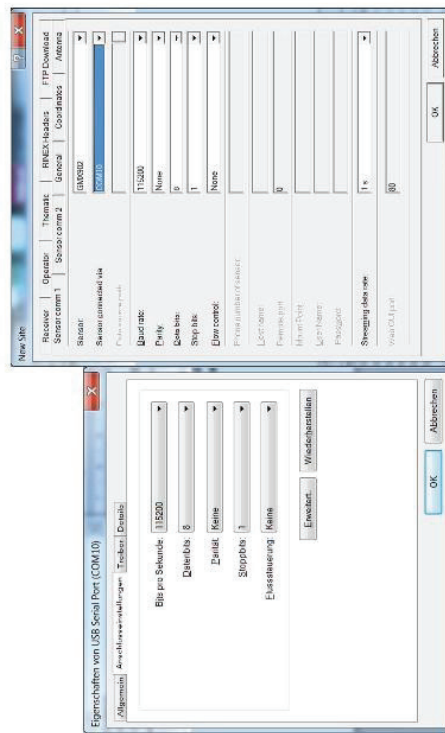
Nachdem der Sensor verbunden ist, kann auch über die Funktion **From Sensor** eine Näherung über die Navigationslösung erreicht werden. Auch können dann über

Auch lässt sich dort jedem Adapter ein fester COM-Port zuweisen, der bei erneutem Verbinden beibehalten wird, sodass in Spider keine Änderungen vorgenommen werden müssen.

Über **Rechtsklick** auf das entsprechende Gerät → **Eigenschaften** → **Anschlüsseinstellungen** → **Erweitert** lässt sich die COM-Anschlussnummer festlegen. Unter **Anschlüsseinstellungen** können weitere Kommunikations-einstellungen getätigt werden.

Die Einstellungen in folgendem Screenshot sind in Spider Standard und können so beibehalten werden.

Wichtig ist die Übereinstimmung der Einstellungen in Gerätemanager und in Spider!
Auch sollten diese bei gleichen, gleichzeitig verbundenen Empfängern identisch sein (z. B. 2x GMX902).



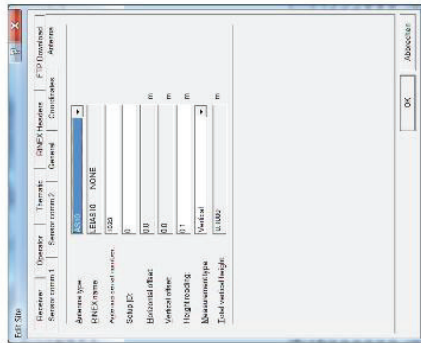
Als **Streaming data rate** wird das Intervall gewählt, in welchem die Messungen erfolgen sollen. Dieses kann zwischen 0,05 und 60 Sekunden liegen.

Der nächste Wichtige Tab ist **General**. Dort werden die Bezeichnungen und Codes der Site, also der Empfangsstation definiert. Außerdem lässt sich festlegen, wofür die damit gewonnenen Daten später verwendet werden können.

- **Provide Original Raw Data:** Im Fall der **Aktivierung** können die Rohdaten einem anderen Site Server zur Verfügung gestellt werden.
- **Use on Network Server:** Falls mit einem Netzwerksver gearbeitet wird, können Daten vom Site Server an den Netzwerksver gesendet werden.

Rechtsklick → **Import Coordinates...**... Koordinaten im csv-Format eingelesen werden.

Im Bereich **Antenna** wird der Antennentyp (GMX901 oder AS10) ausgewählt. Zusätzlich lässt sich hier der vertikal gemessene Höhenoffset (**Height Reading**) von 0,1 m eintragen, der durch den verwendeten Adapter hervorgerufen wird.

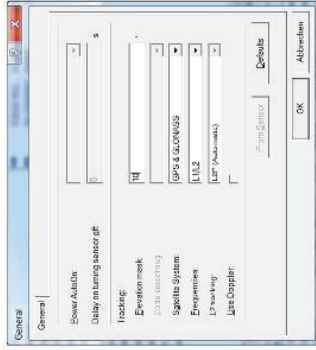


In den Reitern **Receiver**, **Operator** und **Thematic** könnten noch zusätzliche Empfänger- und benutzerspezifische Informationen eingegeben werden.

Mit **OK** werden alle diese Eingaben bestätigt und gespeichert sowie der Empfänger dem Site-Menü zugefügt. Diese Schritte sind für alle weiteren Empfänger zu wiederholen.



Im nächsten Bereich, **Sensor**, können die Beobachtungsgrößen für den jeweiligen Empfänger festgelegt werden. Per **Doppelklick** oder **Rechtsklick** → **Properties...** auf den Sensor gelangt man in das entsprechende Fenster.



Hier kann die Elevationsmaske festgelegt werden. Außerdem können im Falle der GMX902GG Receiver GPS und GLONASS als zu verwendende GNSS sowie die Frequenzen eingestellt werden. Wird dort **all** selektiert, so werden alle von der Empfängerlizenz unterstützten Frequenzen gemessen. **L2 tracking** wird nur für Sensoren wie GR10 und die 1200-Reihe unterstützt, und kann somit auf **automatic** belassen werden.

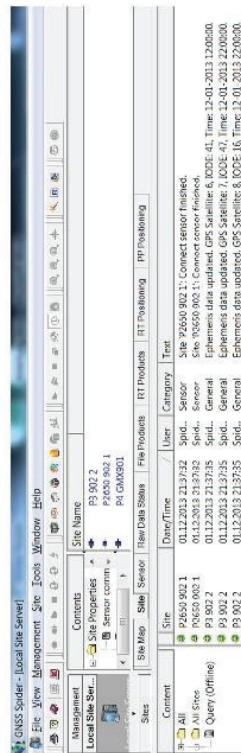
Für offene Fragen zu diesem oder den folgenden Abschnitten sollte die Spider Hilfe (**Help** → **Contents and Index...**) zu Rate gezogen werden. Kann sie auf diesem Weg nicht aufgerufen werden, so ist sie auch auf der NRS-DVD unter **...Documentation\Leica_GNSS_Spider\Getting_Started_Guides\GNSS_Spider** unter dem Namen **GNSS Spider** aufzufinden.

In diesem Verzeichnis liegen außerdem noch eine **QuickTour** (...) pdf sowie der **GNSS_Spider_User_Guide_v4.01.pdf**, die ebenfalls bei der Fragenbeantwortung behilflich sein können, da sie zusätzliche z. T. weiterführende Informationen enthalten.

5. Durchführung der Messung

Nach erfolgreichem Verlegen der Kabel, Aufbau und Konfigurieren der Sensoren, kann nun mit den ersten Schritten zum Beginn der Messung gestartet werden. Dabei sollen in Echtzeit die Positionen eines oder mehrerer Empfänger kontinuierlich über eine bestimmte Zeit registriert werden. Das zugrundeliegende Prinzip ist die Berechnung der Positionen mittels Basislinien zwischen einer Referenz und einem/mehreren Rover/n (RT Positioning).

Die Empfänger sind bereits konfiguriert und mit dem PC, jedoch noch nicht mit Spider verbunden. Einer oder mehrere Empfänger lassen sich in den Tabs *Site*, *Sensor* und *Raw Data Status* markieren und mit anschließendem **Rechtsklick** → **Connect...** mit Spider verbinden.

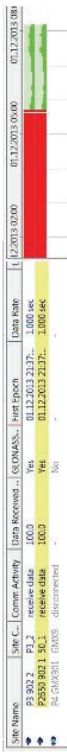


Die entsprechenden Erfolgsmeldungen, meist gepaart mit den ersten Updates der broadcasting Ephemeriden (Anzeige im Ereignisbereich unten) sollten den Verbindungsvorgang bestätigen.

Bei Nichterfolg („Connect Sensor failed...“ o. ä.) kann dies mehrere Ursachen haben. Die GMS902 Receiver schalten sich nach gewisser Zeit am Stromnetz ohne Verbindung zu Spider ab (LED's aus!). Sollte dies der Fall sein, genügt es den PWR-Anschluss für einige Sekunden zu entfernen und anschließend wieder einzustecken.

Weiterhin könnte das Problem in den Strom- bzw. Datenverbindungen liegen, weshalb alle Verbindungen erneut geprüft werden sollten. Bringt auch das keinen Erfolg und kann davon ausgegangen werden, dass keine Kabel- bzw. Geräte-defekte vorliegen, so sollte noch einmal die Frage der USB-Seriell-Adaptertreiber geprüft werden (siehe Punkt 4).

Anschließend kann in den Bereich **Raw Data Status** gewechselt werden. Hier wird geprüft, ob genügend Daten für eine Messung empfangen werden. Unter **Comm Activity** muss für die verbundenen Empfänger „receive data“ vermerkt sein. Der Wert für **Data Received** sollte knapp unter oder genau 100,0 entsprechen. Ist dies nicht der Fall und bessert er sich auch nicht nach einiger Zeit, so ist davon auszugehen, dass nicht genügend Satelliten beobachtet werden können (z. B. aufgrund von Datenübertragungsproblemen oder zu hohen Abschattungen).



Die grafische Ansicht im Fenster rechts gibt Auskunft über die beobachteten Satelliten in der letzten Zeit:

Farbe	Bedeutung
Klar (transparent)	Empfänger nicht verbunden
Rot	Fehlende Daten / Datenlücke
Gelb	Datenfluss, 4 oder weniger Satelliten werden beobachtet
Grün	5 oder mehr Satelliten werden beobachtet

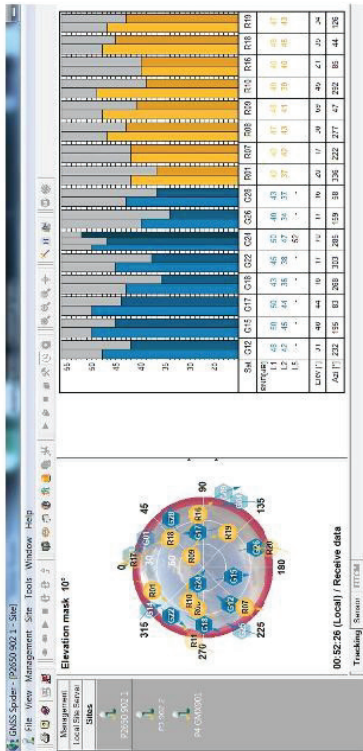
Das Dunkelgrün im grünen Graphen signalisiert die Anzahl der beobachteten Satelliten und reicht von Stufe 1 (5 Satelliten) bis zur höchsten Stufe (1+ Satelliten).

Auch die Empfängerinformationen im linken Fenster besitzen farbliche Attribute:

Schriftfarbe	Bedeutung
Grün	Empfänger nicht verbunden
Rot	Datenlücke
Blau	Empfängereinstellungen wurden in Spider geändert, jedoch noch nicht auf den Empfänger geladen – für Upload Rechtsklick auf Empfänger → Upload Settings
Schwarz	Achtung: Empfänger sollte nicht gestartet sein, da sonst aktuelle Messungen unterbrochen werden! Empfänger ist verbunden und empfängt Daten

Um die Zeiten der Datenübertragungen zu synchronisieren, muss die System- bzw. Spiderzeit mit der GPS-Zeit abgeglichen werden. Dazu wird in Spider im Bereich **Raw Data Status** (per **Rechtsklick**) ein Empfänger (z. B. die Referenz) als **MASTER Time Site** definiert. Anschließend wird die Zeile des gewählten Empfängers gelb hinterlegt. Wird die **MASTER Time Site** im Nachhinein noch einmal geändert, so werden auch alle Werte im **Raw Data Status** Bereich zurückgesetzt.

Wählt man im linken Navigationsbereich von Spider die Rubrik **Sites**, lassen sich für jeden verbundenen Empfänger Informationen zu Satellitenanzahl, -konstellation sowie SNR-Werte der einzelnen Satelliten grafisch in Echtzeit ausgeben.



Um Koordinaten in UTM ausgeben zu bekommen, muss vor der Messung noch eine Einstellung geändert werden. Diese ist über **Tools** → **Configuration...** → **UTM Projection** zu finden.

The screenshot shows the 'UTM Projection' configuration dialog box. It has a 'General' tab with the following settings: False E: 500000, False N: 0, Zone width: 6, Zone offset: 31. The 'OK' button is at the bottom right.

Hier muss für die nördliche Hemisphäre noch der Wert 500000 bei False Easting eingegeben werden. Bleibt diese Einstellung unberührt, so gibt Spider später die Koordinaten in einem lokalen Bezugssystem aus.

Schließlich kann mit dem Anlegen eines neuen RT Positioning Produkts begonnen werden. Dafür wird in den gleichnamigen Bereich navigiert und mit **New...** das Einstellungsfenster aufgerufen.

The screenshot shows the 'New RT Positioning Product' dialog box. It has a 'General' tab with the following settings: Product name: P1, Product code: P1, Product length: 1h, Active type: Realtime, Chain up files: None. The 'OK' button is at the bottom right.

Dort werden Rover (Site) und Referenzstation (Reference Site) aus den konfigurierten Stationen ausgewählt. Außerdem muss eingestellt werden, wohin und in welcher Form die Positionen gesendet bzw. gespeichert werden.

Soll die Datenanalyse in Matlab erfolgen wird hier **None** selektiert und anschließend die Datenspeicherung (unter Logging) aktiviert. Dabei müssen Speicherort und die Länge des Produkts definiert werden. Produktlänge bedeutet, dass nach gewähltem Zeitraum jeweils eine Datei angelegt wird, in der die Positionen in Echtzeit gespeichert werden. Ist die Grenze (z. B. 12 Stunden) erreicht, so wird eine neue Datei für die nächsten 12 Stunden angelegt usw.

Das speziell für diese Anleitung geschriebene Matlab-Programm kann verwendet werden, da es auf das Auslesen von Dateien im NMEA LLQ Format angepasst wurde. Eine Übersicht der Formatbeschreibungen von in Spider gängigen NMEA-Formaten ist dem Anhang beigelegt. Dies erleichtert die Abstimmung eines eigenen Matlab Programmes.

Präzise Ephemeriden standen nicht zur Verfügung, darum wurden die broadcast Ephemeriden genutzt. Weiterhin lässt sich eine Smoothingfunktion einschalten indem die Länge des anzuwendenden Filters eingestellt wird. Bei **Initialisation** gibt es auch mehrere Auswahlmöglichkeiten:

- Initialisierung**
 - On known point**: Schnellste/zuverlässigste Art der Initialisierung, dafür müssen genaue Koordinaten bekannt sein, geeignet nur für Empfänger die sich garantiert nicht bewegen
 - While moving**: Mehrdeutigkeiten werden „on the fly“ gelöst, die Näherungskordinaten müssen bekannt sein, geeignet für Empfänger mit erwarteten Bewegungen
 - Quasi static**: Kombination beider o.g. Verfahren, für Empfänger mit erwarteten Bewegungen (nicht geeignet für weite oder schnelle Bewegungen)

Aufgrund der herstellereigenen Beschreibung erschienen für eine Überwachungsmessung die letzten beiden Möglichkeiten geeignet, hier wurde **Quasi static** genutzt.

Die *Data Rate* kann unter *Rates* eingestellt werden, daraus ergibt sich in welchem Intervall die Positionen neu berechnet und gespeichert werden. Sie muss der gleichen, oder einem Vielfachen der zuvor eingestellten *Observation rate* entsprechen!

Alternativ ist es möglich, die Daten direkt an das Programm *Leica Spider QC* zu senden. Dafür muss *TCP/IP* als Übertragungsart (*Send Positions to...*) gewählt werden, unter *Channel* ist eine freie Portnummer für den Datenstream einzugeben (z. B. 11000). Das zusätzliche Speichern der Daten kann deaktiviert werden.

Mit *OK* werden diese Angaben gespeichert und das neue *RT Positioning* Produkt angelegt. Diese Schritte sind nun für alle weiteren Rover zu wiederholen. Um die Arbeit etwas zu erleichtern kann das Einstellungsfenster erneut mittels *Rechtsklick* auf das bereits erstellte Produkt und → *New Copy...* geöffnet werden; die bereits getroffenen Auswahlhien sind voreingestellt.

Um eine Messung zu beginnen, muss das *RT Positioning* Produkt aktiviert sein (→Rechtsklick → *Active...*). Dies wird in der ersten Spalte im *RT Positioning* Bereich mit *yes* und grünem Icon bestätigt. Außerdem müssen auch die verbundenen Empfänger, welche zum *RT Pos Produkt* gehören, gestartet werden! Dies kann in den Tabs *Sfe*, *Sensor* oder *Raw Data Status* per Rechtsklick auf die Empfänger → *Start* erreicht werden.

Ab dem Moment, wo das Produkt gestartet und die beteiligten Empfänger aktiviert sind, beginnt *Spider* mit der Messung und dem Anlegen der ersten Datei (Endung *.rtf*). Die Ergebnisse der Basislinie, der Höhe, Breite und Länge des Rovers und Informationen zu Satellitenanzahl und –geometrie werden ab jetzt auch in Echtzeit im *RT Positioning* Tab angezeigt.



6. Datenübernahme

6.1 MATLAB

Für die Datenübernahme in MATLAB spielt das gewählte NMEA-Format eine wichtige Rolle. Danach variiert die gesamte Struktur der ausgegebenen (Stream-) Dateien. Um den Programmieraufwand zu erleichtern, wurden die Header (Kopfzeilen) der Positionsdateien manuell entfernt.

Im erzeugten MATLAB-Programm wurde zunächst über den Befehl `fid = fopen('Unterordner/Dateiname.rtf', 'r');` die gewünschte Datei geöffnet und gelesen.

Die Zeilen der ausgegebenen *.rtf-Datei (im NMEA-Format) haben folgende Form:

```
$GPRMC,17.7527,00.0923113,383741.342,M,5935601.469,M,2.07,0.738,70.391,M,1A
```

Deshalb wurden als nächstes mittels `textscan`-Command die einzelnen Objekte in Formatklassen beschrieben, und die benötigten (u.a. East, North, Höhe) in einem sogenannten *Cell Array* abgelegt.

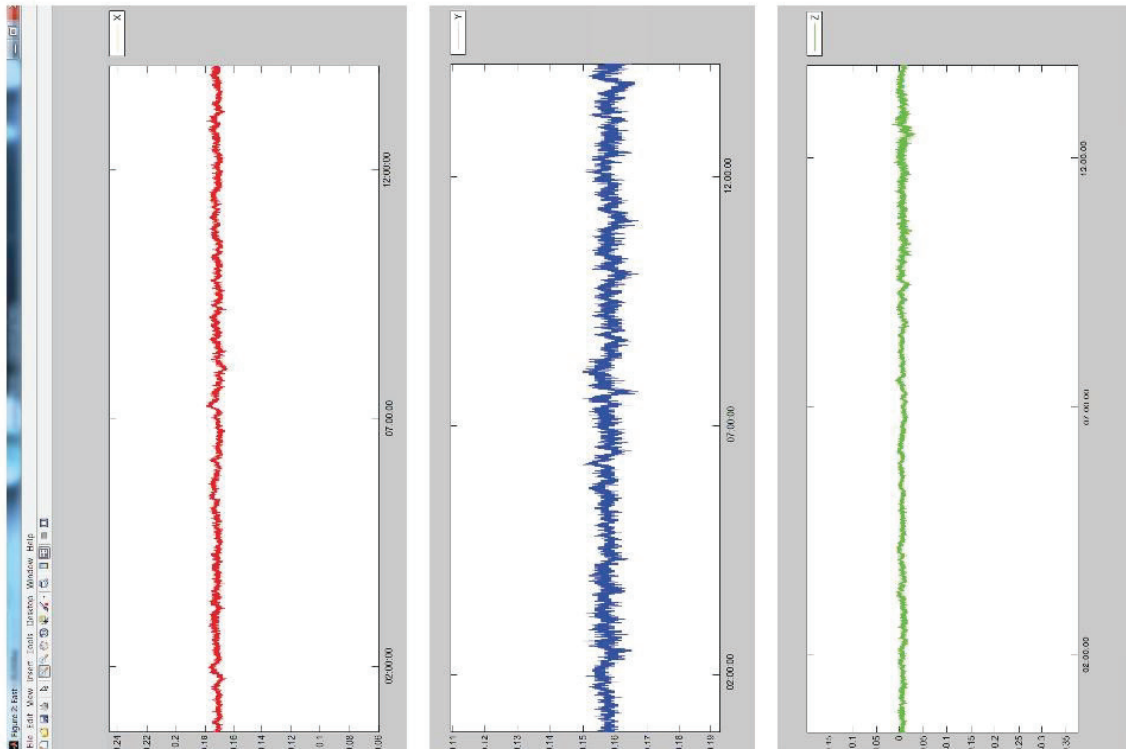
```
A = textscan(fid, '%s %i %s %i %s %i %s %d %d %d %d %f %f %f %s',  
'delimiter', ',', 1);  
fclose(fid);
```

```
s = Read a string  
E = Read a number and convert to double  
d = Read a number and convert to int32  
* = ignore  
delimiter – Trennzeichen (,)
```

Anschließend wurde der *Cell Array* in Vektoren umgewandelt:

```
UTC = [A{1}];  
Date = [A{2}];  
East = [A{3}];  
North = [A{4}];  
Height = [A{5}];  
  
% Arrays initialisieren  
Y(1) = 0;  
X(1) = 0;  
Z(1) = 0;
```

Mit Hilfe einer *for*-Schleife ließen sich dann die Koordinaten- bzw. Höhendifferenzen zwischen den einzelnen Beobachtungen berechnen und unter Anwendung des `plot`-Befehls grafisch ausgeben.



6.2 Leica SpiderQC

Die mit GNSS Spider gewonnenen Daten können auch in Leica SpiderQC eingelesen und grafisch ausgegeben werden. Für die Schritte in dieser Anleitung wird vorausgesetzt, dass beide Programme auf dem gleichen Computer installiert sind und ausgeführt werden.

Die in Spider durchzuführenden Schritte wurden besonders am Ende des Abschnitts 5. geklärt. Hier noch einmal die Grundvoraussetzungen:

- **Send Positions to...** → **TCP/IP**,
- unter **Channel Eingabe** der freien Portnummer für Datenstream (z. B. 11000),
- das RT Positioning Produkt muss aktiviert und die Empfänger müssen gestartet sein;
- das Site Server Passwort liegt vor.

In SpiderQC wird der NMEA-Stream aus Spider ausgewählt (**Edit** → **NMEA Connections** → **From Spider**).

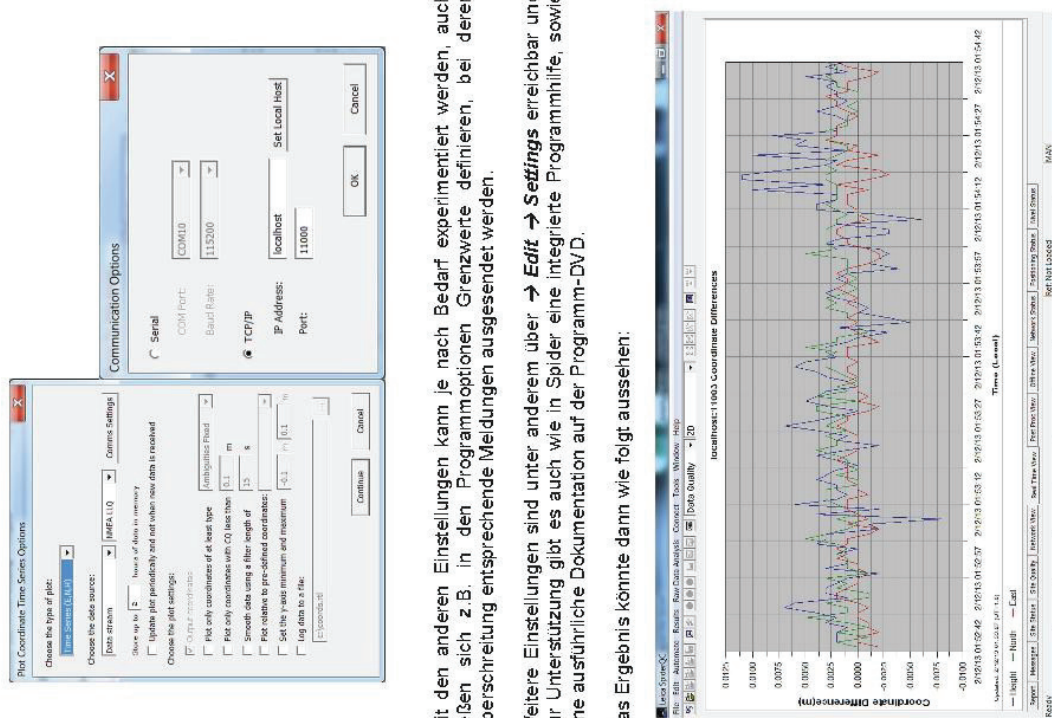


Als Server wird „localhost“ und als Passwort das des Site Servers eingetragen und mit OK bestätigt.

Eine eventuell auftretende Fehlermeldung kann vorerst ignoriert und mit OK geschlossen werden. Diese wird im weiteren Verlauf erneut auftreten, eine Lösung wurde noch nicht gefunden.

Daraufhin sollte die Meldung, dass eine neue NMEA-Verbindung hinzugefügt wurde erscheinen.

Nun können über → **Tools** → **Plot Coordinate Time Series...** die Einstellungen für die grafische Ausgabe in Echtzeit getroffen werden. Dabei ist Data Stream mit dem Format NMEA LLQ auszuwählen und unter Comm Settings und TCP/IP der in Spider deklarierte Port einzugeben.



Mit den anderen Einstellungen kann je nach Bedarf experimentiert werden, auch
ließen sich z.B. in den Programmoptionen Grenzwerte definieren, bei deren
Überschreitung entsprechende Meldungen ausgesendet werden.

Weitere Einstellungen sind unter anderem über **→ Edit → Settings** erreichbar und zur Unterstützung gibt es auch wie in Spider eine integrierte Programmhilfe, sowie eine ausführliche Dokumentation auf der Programm-DVD.

Das Ergebnis könnte dann wie folgt aussehen:

Anhang

Zusammengefasste Übersicht der in Spider gängigen NMEA-Formate aus der Leica GNSS Spider Hilfe

Overview of NMEA- and NMEA-like-formats

GGQ - standard format for transmission of coordinate and coordinate quality information from GPS receivers

GGA - standard format for transmission of geographic coordinates and dilution of precision information

דוס - standard format for transmission of local coordinates and coordinate quality information

in order to output the LLQ message in UTM, there are several settings which the operator must configure for the correct transformation to be carried out. See UTM Projection for more information.

The C11-C33 values are from the co-factor matrix (not the variance-covariance matrix and hence are not scaled by the a posteriori variance factor term) and correspond to latitude, longitude and height.

latitudes and longitudes.

Example:

[illegible][illegible]

Anhang III: MATLAB – Einlesen Messdatei, grafische Ausgabe der Koordinaten- und Höhendifferenzen und Berechnung und Ausgabe von Mittelwerten und Standardabweichungen

```
format long

% fid = fopen('Data/902_20130924_090116.rtl', 'r');
fid = fopen('DataGMX901/901_20130925.rtl', 'r');

%$GPLLQ,173527.00,092313,-
16258.658,M,5935601.469,M,2,07,0.738,70.391,M*1A
A = textscan(fid, '%*s %f %s %f %*s %f %*s %*d %*d %*f %f %*s',
'delimiter', ',');

fclose(fid);

UTC      = [A{1}];
Date     = [A{2}];
East     = [A{3}];
North    = [A{4}];
Height   = [A{5}];

% Arrays initialisieren
Y(1) = 0;
X(1) = 0;
Z(1) = 0;

n = length(UTC)

Datum_korr = [];

sum_east = 0;
sum_north = 0;
sum_height = 0;

StabwEast = [];
StabwNorth = [];
StabwHeight = [];

for i = 1:n
    Y(i) = East(1) - East(i);
    X(i) = North(1) - North(i);
    Z(i) = Height(1) - Height(i);
    % Datum_korr = datenum(Date(i), 'mmddyy');

    % sum_east = sum_east + East(i);
    % sum_north = sum_north + North(i);
    % sum_height = sum_height + Height(i);
end

% mittel_east = sum_east / n
% mittel_north = sum_north / n
% mittel_height = sum_height / n

sEast= std(East)
sNorth = std(North)
```

```

sHeight = std(Height)

Y(1) = 0;
X(1) = 0;
Z(1) = 0;
Datum_korr(1) = 0;

%Plotten
hFig = figure(1);
set(hFig, 'Position', [400 400 1000 175], 'Name', 'North');
axes('position', [.025 .15 .97 .7]);

plot(X, 'b')
hold all
hold off

% X-Achse
dateFormat = 13;
datetick('x', dateFormat, 'keepticks')
axis tight

% Legende
legend('Y', 'Location', 'NorthEastOutside');

hFig = figure(2);
set(hFig, 'Position', [400 400 1000 175], 'Name', 'East');
axes('position', [.025 .15 .97 .7]);

plot(Y, 'r')
hold all
hold off

% X-Achse
dateFormat = 13;
datetick('x', dateFormat, 'keepticks')
axis tight

% Legende
legend('X', 'Location', 'NorthEastOutside');

hFig = figure(3);
set(hFig, 'Position', [400 400 1000 175], 'Name', 'Height');
axes('position', [.025 .15 .97 .7]);

plot(Z, 'g')
hold all
hold off

% X-Achse
dateFormat = 13;
datetick('x', dateFormat, 'keepticks')
axis tight

% Legende
legend('Z', 'Location', 'NorthEastOutside');

```


Anhang IV: Regression und Signifikanztests Programm – MATLAB

```
format long

disp('=====')
disp('Datei öffnen')

% fid = fopen('Data/902_20130924_090116.rtl', 'r');
fid = fopen('902_20131016_090142.rtl', 'r');

% $GPLLQ,173527.00,092313,-
116258.658,M,5935601.469,M,2,07,0.738,70.391,M*1A
A = textscan(fid, '%*s %f %s %f %*s %f %*s %*d %*d %*f %f %*s',
'delimiter', ',');

fclose(fid);

UTC    = [A{1}];
Date   = [A{2}];
East   = [A{3}];
North  = [A{4}];
Height = [A{5}];

q = 2;
sigma = 0.01;

% Arrays initialisieren
Y(1) = 0;
X(1) = 0;
Z(1) = 0;

for i = 1:n
    Y(i) = East(1) - East(i);
    X(i) = North(1) - North(i);
    Z(i) = Height(1) - Height(i);
end

n = length(UTC);

East60 = [];
North60 = [];
Height60 = [];
Zeit60 = [];
One60 = [];

disp('Messwerte reduzieren')

for i = 1:n
    if mod(i, 60) == 0
        East60 = [East60; Y(i)];
        North60 = [North60; X(i)];
        Height60 = [Height60; Z(i)];
        Zeit60 = [Zeit60; i];
        One60 = [One60; 1];
    end
end
```

```

save East60
save North60
save Height60
save Zeit60

disp('Anzahl der Messwerte (Intervall: 60 s)')
m = length(North60)

A_1 = ones(1, m);
A_2 = linspace(1, m, m);
%A = [A_1; A_2]';
A = [A_1; A_2;]'; % A_2.^2'; % A_2.^3; A_2.^4; A_2.^5; A_2.^6; A_2.^7;
A_2.^8; A_2.^9; A_2.^10; A_2.^11; A_2.^12; A_2.^13; A_2.^14; A_2.^15];

Sigma_ll = zeros(m);

for i = 1:m
    Sigma_ll(i, i) = sigma^2;
end

Q_ll = 1 / sigma^2 * Sigma_ll;

P = inv(Q_ll);
A_trans = A';

disp('Dimensionen von A^T, P und A')
size(A_trans)
size(P)
size(A)

disp('N berechnen')
N = A_trans * P * A;

disp('Qxx berechnen')
Qxx = inv(N);

disp('F^ berechnen')
b = polyfit(Zeit60, Height60, q-1)' % = q-1
%b = [-1.1626e+005; -4.5315e-007]

F_hat = (b' * N * b) / (q * 1)

disp('Testgrößen der t-Verteilung')
l = length(b);
for i = 1:l
    t = b(i) / sigma
end

hFig = figure(1);
set(hFig, 'Position', [400 400 1200 175], 'Name', 'East');
axes('position', [.025 .15 .97 .7]);

plot(Height60, 'r')
hold all
hold off

```

Anhang V: Ergebnisse (Mittel) der Langzeitmessungen mit GMX901 und GMX902GG

GMX901

Tag	MittelEast [m]	MittelNorth [m]	MittelHöhe [m]
1	383742.077	5935602.509	70.423
2	383742.076	5935602.502	70.424
3	383742.080	5935602.494	70.403
4	383742.085	5935602.498	70.413
5	383742.072	5935602.488	70.400
6	383742.069	5935602.501	70.424
7	383742.076	5935602.487	70.397
8	383742.079	5935602.484	70.410
9	383742.086	5935602.475	70.418
10	383742.087	5935602.491	70.413
11	383742.084	5935602.465	70.412
12	383742.099	5935602.490	70.421
13	383742.092	5935602.482	70.426
14	383742.081	5935602.483	70.417
15	383742.087	5935602.490	70.411
16	383742.091	5935602.492	70.391
17	383742.081	5935602.496	70.397
18	383742.092	5935602.479	70.414
19	383742.087	5935602.489	70.431
20	383742.098	5935602.492	70.419
21	383742.092	5935602.476	70.423
22	383742.084	5935602.480	70.388
23	383742.093	5935602.483	70.377
24	383742.084	5935602.488	70.392
25	383742.094	5935602.489	70.380
26	383742.105	5935602.478	70.402
Mittel	383742.086	5935602.488	70.409

GMX902GG

Tag	MittelEast [m]	MittelNorth [m]	MittelHöhe [m]
1	383744.9451	5935603.0099	70.3935
2	383744.9450	5935603.0095	70.3940
3	383744.9448	5935603.0099	70.3952
4	383744.9450	5935603.0099	70.3938
5	383744.9452	5935603.0100	70.3936
6	383744.9453	5935603.0100	70.3935
7	383744.9453	5935603.0100	70.3934
8	383744.9453	5935603.0100	70.3935
9	383744.9454	5935603.0099	70.3935
10	383744.9453	5935603.0099	70.3934
11	383744.9454	5935603.0099	70.3934
12	383744.9452	5935603.0098	70.3930
13	383744.9455	5935603.0099	70.3934
14	383744.9454	5935603.0100	70.3934
15	383744.9453	5935603.0099	70.3934
16	383744.9449	5935603.0101	70.3940
17	383744.9454	5935603.0098	70.3965
18	383744.9454	5935603.0100	70.3934
19	383744.9454	5935603.0100	70.3933
20	383744.9453	5935603.0101	70.3935
21	383744.9454	5935603.0100	70.3935
22	383744.9452	5935603.0099	70.3936
23	383744.9454	5935603.0100	70.3933
24	383744.9452	5935603.0100	70.3935
25	383744.9452	5935603.0100	70.3934
Mittel	383744.9453	5935603.0099	70.3937

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konstellation des IRNSS (MAJITHIYA et al., 2011)	6
Abbildung 2: GPS-Bodensegment (BAUER, 2011)	7
Abbildung 3: Definition des WGS84-Koordinatensystems (NIMA, 2000).....	8
Abbildung 4: Segmente eines GNSS (KUMMER und FRANKENBERGER, 2010, S. 230).....	9
Abbildung 5: GMX902 GG-Empfänger & AS10, GMX901 (LEICA GEOSYSTEMS AG, 2013)	15
Abbildung 6: Bestimmung der Trägerphasendifferent mit zwei Empfängern (MANSFELD, 1998, S. 227).....	16
Abbildung 7: SAPOS-Referenzstationen (ADV, 2013).....	19
Abbildung 8: Funktionsschema SAPOS HEPS (AdV, 2013)	20
Abbildung 9: Empfang bei von Wellen bei Mehrwegeeffekten (MANSFELD, 1998, S. 60)	24
Abbildung 10: Signalbeugung (BAUER, 2011, S. 116)	25
Abbildung 11: Messpfeiler und anliegende Beobachtungsstation (Fotografie: M. Scholz).....	32
Abbildung 12: GMX902GG-Empfänger mit Höhenadapter (Fotografie: M. Scholz)	33
Abbildung 13: Aufbau GMX902GG (LEICA GEOSYSTEMS AG, 2007)	34
Abbildung 14: Aufbau GMX901 Aufbau GMX902GG (LEICA GEOSYSTEMS AG, 2007)	35
Abbildung 15: Besetzung der Messpfeiler (eigene Darstellung)	37
Abbildung 16: Aktiviertes RT Positioning Produkt mit Position in Echtzeit (eigene Darstellung)	38
Abbildung 17: Beobachtungspunkte P4, P3 und Referenzstation P25650 (Fotografie: Martin Scholz).....	39
Abbildung 18: AS10 auf Kreuzschlitten (Fotografie: M. Scholz)	39
Abbildung 19: Untersuchung Höhenänderungen (Fotografie: M. Scholz)	40
Abbildung 20: Versuchsaufbau zur Untersuchung von Abschattungseinflüssen (eigene Darstellung)	41
Abbildung 21: MATLAB - Koordinaten- und Höhendifferenzen [m] des GMX902-Empfängers über einen halben Tag betrachtet (eigene Darstellung)	43
Abbildung 22: Grafische Ansicht Satellitenkonstellation und SNR in Spider (eigene Darstellung)	45
Abbildung 23: Diagramme SNR bzw. Multipath/Elevation (eigene Darstellung).....	45
Abbildung 24: Grafische Ausgabe der Koordinaten- und Höhendifferenzen mittels Leica SpiderQC (eigene Darstellung)	46
Abbildung 25: Koordinatendifferenzen East [m] über 25 Tage (eigene Darstellung)	47
Abbildung 26: GMX901 - Periodische Verluste der Trägerphasenbeziehungen sichtbar an den East-Wert-Differenzen [m] (eigene Darstellung)	48
Abbildung 27: GMX901 - gemittelte East-Werte pro Tag (eigene Darstellung)	49

Abbildung 28: GMX902GG - gemittelte East-Werte pro Tag (eigene Darstellung).....	49
Abbildung 29: GMX901 - gemittelte North-Werte pro Tag (eigene Darstellung)	50
Abbildung 30: GMX902GG - gemittelte North-Werte pro Tag (eigene Darstellung) ...	50
Abbildung 31: GMX901 - Gemittelte Höhen pro Tag (eigene Darstellung)	51
Abbildung 32: GMX902GG - gemittelte Höhen pro Tag (eigene Darstellung)	51
Abbildung 33: Linearer Trend am Beispiel der Eastwerte über 1440 Minuten (ein Tag) (eigene Darstellung)	55
Abbildung 34: ausgleichende Trendfunktion 40. Grades und Verbesserungen über Zeit[h]/2,5 (eigene Darstellung)	56
Abbildung 35: ausgleichende Trendfunktion 6. Grades und Verbesserungen über Zeit[h]/2,5 (eigene Darstellung)	56
Abbildung 36: 1 cm-Verschiebungen East	57
Abbildung 37: 1 cm-Verschiebungen North	57
Abbildung 38: 5 mm-Verschiebungen East	58
Abbildung 39: 5 mm-Verschiebungen North	59
Abbildung 40: GMX902GG Höhenänderungen um 320 mm (eigene Darstellung)	59
Abbildung 41: SNR über Elevation ohne und unter starken Abschattungseinflüssen (eigene Darstellung)	61
Abbildung 42: Koordinatendifferenzen der Northwerte [m] ohne (oben) und bei teilweiser Abschattung (unten) (eigene Darstellung)	62
Abbildung 43: Reduzierte Northwerte ohne (oben), unter teilweiser (mittig) und unter starker Abschattung (unten), sowie angenäherte Polynomregression (40. Grades) (eigene Darstellung).....	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick der Systemkomponenten GPS & GLONASS (KUMMER und FRANKENBERGER, 2010, S. 231)	5
Tabelle 2: Signalcodes (BAUER, 2011, S. 238 ff.).....	12
Tabelle 3: Kommunikationslösungen zur Echtzeit-Korrekturdatenübertragung an mobile Nutzer (WILLGALIS, 2005, S. 83)	21
Tabelle 4: Übersicht geodätischer Messverfahren und pauschale Messunsicherheiten (HEUNECKE et al., 2013)	27
Tabelle 5: Verwendbare Methoden der Initialisierung.....	37
Tabelle 6: Standardabweichungen Langzeitmessung	52
Tabelle 7: Gemittelte Koordinaten nach Abschluss der Langzeitmessung	52
Tabelle 8: Vergleich des Punktes P4 mit zwei Empfängern	52
Tabelle 9: Ergebnisse Ausgleichung Langzeitmessung.....	54
Tabelle 10: GMX902 GG - Verschiebungen um 1 cm	57
Tabelle 11: GMX902 GG - Verschiebungen um 5 mm	58
Tabelle 12: Differenzen der Höhenänderungen	60
Tabelle 13: Qualitätsgrößen der Messungen (SpiderQC)	60
Tabelle 14: Ergebnisse Untersuchung Abschattungseinflüsse	62

Abkürzungsverzeichnis

AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
ASCOS	Satellitenreferenzdienst der Firma AXIO-Net GmbH
BDS	BeiDou Navigation Satellite System (Chinesisches Satellitennavigationssystem)
CDMA	Code Division Multiple Access
COM	Communication port
COMPASS	Chinesisches Satellitennavigationssystem (Vgl.: BDS)
DAB	<i>Digital Audio Broadcasting</i>
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System
DGPS	Differential Global Positioning System
DOP	Dilution Of Precision
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial
3D	Dreidimensional
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EPS	Echtzeit-Positionierungs-Service
ESA	Europäische Weltraumorganisation
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FKP	Flächenkorrekturparameter
Galileo	Europäisches Globales Satellitennavigationssystem (= Europäisches GNSS)
GGA	NMEA-Format
GGQ	NMEA-Format
GHPS	Geodätischer Hochpräziser Positionierung-Service
GLONASS	Global'naja Navigacionnaja Sistema (Russisches Navigationssatellitensystem)

GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
GPS	Global Positioning System
GPPS	Geodätisch Präziser Positionierungs-Service
HEPS	Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service mit Vernetzung
IAC	Information-Analytical Center (of positioning navigation and timing)
IERS	International Earth Rotation Service
IP	Internet Protocol
IRNSS	Indisches Regionales Navigationssatellitensystem
IRP	IERS Referenz Pol
IRM	IERS Referenz Meridian
ITRS	International Terrestrial Reference Frame
LB2	Leica binary 2
LLQ	NMEA-Format
LW	Langwelle
MAC	Master-Auxiliary-Concept
MATLAB	Software des Unternehmens The MathWorks
NAVstar	Navigation satellite timing and ranging
NIMA	National Imagery and mapping agency
NMEA	National Marine Electronics Association
NTRIP	Networked transport of RTCM via internet protocol
PP	Postprocessing
PRN-Code	Pseudo Random Noise Code
PZ	Parametri Zemli
QC	Quality Check (Leica-Programm)
RINEX	Empfänger Independent Exchange Format
RT	Real time

RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematic
SA	Selective Availability
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
SNR	Signal-to-Noise-Ratio
TAI	Temps atomique international
TCP	Transmission Control Protocol
UdSSR	Union der Sozialistischen Sowjetrepubliken
UHF	Ultra-High-Frequency
UKW	Ultrakurzwelle
UTC	Coordinated Universal Time
UT	Universal time
VHF	Very high frequency
VRS	Virtuelle Referenzstation
WGS	World Geodetic System

Literaturverzeichnis

AdV: *Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung*. <http://www.sapos.de/>. [Online; Stand 10. Oktober 2013].

BAUER, M.: *Vermessung und Ortung mit Satelliten. GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme*. 6. Auflage. Heidelberg: Wichmann, 2011.

[BMFVBS] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG: *Galileo - das europäische Satellitennavigationssystem*. <http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Artikel/UI/galileo-das-europaeische-satellitennavigationssystem.html>. Version: 2013. [Online; Stand 10. Oktober 2013].

EICHHORN, A.: *Monitoring: ein grundlegender Beitrag zur Überwachung von Bauwerken*. In: AVN – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 4, S. 123–131. 2012.

FLÜHR, H.: *Avionik und Flugsicherungstechnik. Einführung in Kommunikationstechnik, Navigation und Surveillance*. 2. Auflage. Springer, 2012.

FOPPE, K.: *Ausgleichungsrechnung mit Interpretation der Ausgleichungsergebnisse*. Hochschule Neubrandenburg, 2009.

FOPPE, K.; NEITZEL, F.: *Von der Zufallsgröße zur Trendschätzung im vermittelnden Ausgleichungsmodell – Grundlagen zur Zeitreihenanalyse für Praktiker*. In Veröffentlichung. DVW e. V.. 2014.

HEUNECKE, O.; KUHLMANN, H.; WELSCH, W.; EICHHORN, A.; NEUNER, H.: *Handbuch Ingenieurgeodäsie. Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen*. 2. Auflage. Berlin: Wichmann, 2013.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J.: *GPS Theory and Practice*. 4. Auflage. Wien: Springer, 1997.

IAC, Russia Korolyov: *GLONASS history*. <http://glonass-iac.ru/en/guide/>. Version: 2013. [Online; Stand 11. Oktober 2013].

JOECKEL, R.; STÖBER, M.; HUEP, W.: *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren*. 5. Auflage. Heidelberg: Wichmann, 2008.

KAPLAN, E. D.: *Understanding GPS. Principles and Applications*. Norwood, MA: Artech House, 1996.

KEYNES, M.: *Monitoring Europe's tallest building*. In: Leica Geosystems TruStory. 2012.

KNICKMEYER, E. T.: *Landesvermessung*. Skriptteile 7 und 8. Geodäsie und Geoinformatik. Hochschule Neubrandenburg, 2009.

KUMMER, K.; FRANKENBERGER, J.: *Das deutsche Vermessung- und Geoinformationswesen*. Heidelberg: Wichmann, 2010.

LEICA GEOSYSTEMS AG: *Leica GMX901*. Gebrauchsanweisung. Version 1.0. Heerbrugg, Switzerland. 2007.

LEICA GEOSYSTEMS AG: *Leica GMX902 GG*. Gebrauchsanweisung. Version 1.0. Heerbrugg, Switzerland. 2007.

LEICA GEOSYSTEMS AG: *Networked Reference Stations*. <http://www.leica-geosystems.de/>. Version: 2013. [Online; Stand 20. Oktober 2013].

LEICA GEOSYSTEMS AG: *GNSS_Spider_User_Guide_v4.0*. Version 4.0. Heerbrugg, Switzerland. 2007.

MAJITHIYA, P; KHATRI, K; HOTA, J. K.: *INSIDE GNSS. Indian Regional Navigation Satellite System*. <http://www.insidegnss.com/node/2429>. Version: 2011. [Online; Stand 10. Dezember 2013].

MANSFELD, W.: *Satellitenortung und Navigation. Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg, 1998.

MISCHKE, A.: *Vorlesung zur Veranstaltung Vermessungskunde. Skript Teil 7: GNSS*. <http://www.ruhr-uni-bochum.de/geodaesie/download/>. Version: 2013. [Online; Stand 01. November 2013].

MÖSER, M.; MÜLLER, G.; SCHLEMMER, H.; WERNER, H.: *Handbuch Ingenieurgeodäsie. Grundlagen*. Bd. 3. Ausgabe. Heidelberg: Wichmann, 2000.

NATIONAL IMAGERY AND MAPPING AGENCY (NIMA); Department of Defence: *World Geodetic System 1984. Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems*. 3. Auflage. TR8350.2, 2000.

NOIDA. ZeeNews.com: *Indian PSLV successfully launches IRNSS-1A navigation satellite*. http://zeenews.india.com/news/space/indian-pslv-successfully-launches-irNSS-1a-navigation-satellite_859281.html. Version: 2013. [Online; Stand 10. Dezember 2013].

SEEBER, G.: *Satellitengeodäsie*. Berlin: de Gruyter, 1989.

TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A.: *GPS for geodesy*. Berlin: Springer. 1998.

TORGE, W.: *Geodäsie*. Stuttgart, Zürich: de Gruyter, 2003.

U.S. GOVERNMENT: *GPS - Space Segment*. <http://www.gps.gov/systems/>. Version: 2013. [Online; Stand 10. Oktober 2013].

WANNINGER, L.: *Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen*. In: Deutsche Geodätische Kommission Heft Nr. 508 (Reihe C), 2000.

WILLGALIS, S.: *Beiträge zur präzisen Echtzeitpositionierung in GPS-Referenzstationsnetzen*, Universität Hannover, Diplomarbeit, 2005.

WITTE, B.; SPARLA, P.: *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. 7. Auflage. Berlin: Wichmann, 2011.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorstehende Bachelorarbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und sowohl wörtliche, als auch sinngemäß entlehnte Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Neubrandenburg, den 16. Dezember 2013

Unterschrift des Kandidaten