

J. Glabsch

Konzeption und Realisierung kosten-  
effizienter GNSS-Monitoring-Systeme  
für ingenieurgeodätische  
Überwachungsmessungen

SCHRIFTENREIHE

---

INSTITUT FÜR GEODÄSIE

*der Bundeswehr*  
*Universität*  *München*



J. Glabsch

Konzeption und Realisierung kosten-  
effizienter GNSS-Monitoring-Systeme  
für ingenieurgeodätische  
Überwachungsmessungen

SCHRIFTENREIHE

---

INSTITUT FÜR GEODÄSIE

*der Bundeswehr*  
*Universität*  *München*

Der Druck dieses Heftes wurde aus Haushaltsmitteln der Universität der Bundeswehr München gefördert.

Auflagenhöhe: 50

Druck und Bindearbeiten:

*Rechenzentrum der Universität der Bundeswehr München, Neubiberg*

Einbanddruck:

*Graphische Werbung Böckmann & Burgstaller GbR, Putzbrunn*

Herausgeber der Schriftenreihe:

*Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München, Neubiberg*

**Bezugsnachweis:**

**Universität der Bundeswehr München  
Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften  
Institut für Geodäsie  
D - 85577 Neubiberg**

ISSN 0173 – 1009

<https://www.unibw.de/IfG/Org/schriftenreihe>

# Konzeption und Realisierung kosteneffizienter GNSS Monitoring-Systeme für ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen

Dipl.-Ing. Jessica Glabsch (geb. Günther)

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der  
Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation.

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke
2. Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schwieger

Die Dissertation wurde am 23. Juni 2017 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht  
und durch die Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften am 13. September 2017  
angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 11. Oktober 2017 statt.



# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	i
Zusammenfassung.....	5
Abstract .....	6
1 Einleitung.....	7
2 Begriffe .....	9
2.1 Monitoring in der Geodäsie.....	9
2.2 Geodätische Monitoring-Systeme .....	11
2.3 GNSS Monitoring .....	14
2.4 Kosteneffizient vs. Low-Cost.....	19
2.5 Qualitätsmerkmale .....	21
3 Einflussgrößen bei GNSS Monitoring-Systemen.....	24
3.1 Satellitensegment .....	25
3.2 Signalübertragungsweg .....	26
3.2.1 Ionosphäre.....	27
3.2.2 Troposphäre .....	29
3.2.3 Stationsumfeld .....	33
3.3 Nutzersegment.....	36
3.4 GNSS Auswertesoftware.....	37
3.5 Supplementäre Auswertung .....	39
3.5.1 Mittelwert und Tiefpassfilterung .....	39
3.5.2 Vermittelnde Ausgleichung .....	42
3.5.3 Korrelationsfunktionen .....	43
4 GeoSN – Beispiel eines Low-Cost GNSS Monitoring-Systems .....	45
4.1 Grundsätzlicher Aufbau und Funktionsweise .....	45
4.1.1 Darstellung der Hardwarekomponenten .....	46
4.1.2 Beschreibung der Systemsoftware .....	49
4.2 Ansteuerung der GNSS Empfänger .....	51
4.2.1 Nachteile proprietärer Software.....	52
4.2.2 Datenformate der Empfänger.....	53
4.2.3 Kommunikation im Sensornetz mit den Empfängern.....	55

4.3	Datenhaltung .....	57
4.4	GeoSN Pilotprojekte .....	60
4.4.1	Funktionsfähigkeitsnachweis Campus UniBwM.....	60
4.4.2	Pilotprojekt Hornbergl .....	62
4.4.3	Pilotprojekt Sudelfeld .....	67
4.4.4	Pilotprojekt Schiffshebewerk Scharnebeck .....	69
4.5	Erfahrungen aus den Pilotprojekten .....	74
4.6	Weitere Low-Cost GNSS Monitoring-Systeme .....	76
4.7	Merkmale des GeoSN .....	80
5	Optimierung bei Low-Cost GNSS Monitoring-Systemen.....	81
5.1	Möglichkeiten für eine Optimierung .....	81
5.1.1	GNSS Netzdesign .....	81
5.1.2	Epochenlänge und Aufzeichnungsrate.....	82
5.1.3	GNSS Sensorik .....	83
5.1.4	GNSS Auswertung.....	85
5.2	Untersuchungen zur Optimierung .....	87
5.2.1	GNSS Netzdesign .....	87
5.2.2	Epochenlänge .....	89
5.2.3	GNSS Sensorik .....	92
5.2.4	GNSS Auswertung.....	95
5.2.5	Weiterführende Untersuchungen .....	100
6	Fazit und Ausblick.....	111
7	Literaturverzeichnis .....	113
8	Web-Literaturverzeichnis .....	126
9	Abkürzungsverzeichnis .....	127
10	Abbildungsverzeichnis .....	130
11	Tabellenverzeichnis .....	132
	Anhang A 1: Nachrichtenstruktur ausgewählter Low-Cost GNSS Empfänger.....	134
	Anhang A 2: Verwendete Nachrichten SS II (nach NOVATEL 2005).....	135
	Anhang A 3: Verwendete Nachrichten OEM V (nach NOVATEL 2007).....	136
	Anhang A 4: Verwendete Nachrichten u-blox (nach U-BLOX 2010B) .....	137
	Anhang A 5: Entity-Relationship-Modell.....	138
	Anhang A 6: Rechtswert # 101 ohne und mit Ausgleichung, Pilotprojekt Scharnebeck (oben GPS & GLONASS, unten GPS).....	139



Anhang A 7: Vergleich unterschiedlicher Epochenlängen, Pilotprojekt Hornbergl.....	140
Anhang A 8: Vergleich unterschiedlicher Epochenlängen, Pilotprojekt Sudelfeld.....	141
Anhang A 9: Vergleich unterschiedlicher Epochenlängen, Pilotprojekt Scharnebeck.....	143
Anhang A 10: Vergleich unterschiedlicher GNSS Sensorik vor und nach Ausreißereliminierung (GPS).....	145
Anhang A 11: Rechtswert der Kombination aus 3G+C Antenne & Lea 6T Empfänger.....	146
Anhang A 12: Vergleich unterschiedlicher GNSS Sensorik vor und nach Ausreißereliminierung (GPS & GLONASS).....	147
Anhang A 13: Getestete Low-Cost GNSS Empfänger .....	148
Anhang A 14: Getestete GNSS Antennen .....	149
Anhang A 15: Getestete Enclosures .....	149
Anhang A 16: Vergleich unterschiedlicher Basislinienprozessoren, Pilotprojekt Hornbergl .....	150
Anhang A 17: Vergleich unterschiedlicher Kriterien für eine optimierte signalstärkenbasierte Prozessierung .....	151
Lebenslauf.....	152
Dank .....	153



## **Zusammenfassung**

Inhalt dieser Arbeit ist es, das Potential von GNSS Einfrequenz-Empfängern mit Trägerphasenausgabe in Monitoring-Systemen für ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen aufzuzeigen. Aus diesem Grund erfolgen Untersuchungen zur Konzeption und Realisierung kosteneffizienter Systeme, bei denen mittels PDGNSS sich langsam vollziehende Bewegungen detektiert werden sollen. Hauptaugenmerkmal liegt in der Verwendung von kostengünstigeren Empfängern (sowohl an den Referenz- als auch an den Roverstationen), deren Auswertung mit verfügbaren Basislinienprozessoren und einer optionalen supplementären Auswertung mit dem Ziel, vollständig automatisiert bestmögliche Ergebnisse in Nahe Echtzeit bei Überwachungsaufgaben zu erreichen.

Durch den zum Teil langjährigen Einsatz des am Institut für Geodäsie an der Universität der Bundeswehr München (UniBwM) entwickelten Low-Cost GNSS Monitoring-Systems – nachfolgend als GeoSN bezeichnet – in Pilotprojekten, konnte dessen Eignung nachgewiesen werden, und es stehen repräsentative Daten für umfangreiche Untersuchungen eines kosteneffizienten GNSS Monitoring-Systems zur Verfügung.

Die zunächst theoretisch vorgestellten Modelle und Verfahren zur Erzielung genauer und zuverlässiger Ergebnisse wurden in das Low-Cost GNSS Monitoring-System GeoSN eingearbeitet. Im Hinblick auf ihre praktische Anwendung muss es ein Ziel sein, dass diese automatisiert in den Auswerteprozess integriert werden. Es können, wie es die empirischen Betrachtungen zeigen, erhebliche Verbesserungen erreicht werden, die das Potential kosteneffizienter GNSS Monitoring-Systeme durch eine optimierte Wahl der Sensorik und durch die Gestaltung der Auswertung erkennen lassen. Hierbei sind insbesondere durch Multi-GNSS Auswertungen, Netzausgleichungen sowie supplementäre Auswertungen mit Methoden der Zeitreihentheorie Optimierungsmöglichkeiten gegeben. Die Ergebnisse der getesteten Basislinienprozessoren lassen sich durch geeignete Maßnahmen weiter verbessern. Jedoch sind die Ergebnisse auch kritisch zu hinterfragen, da stets der gesamte Verlauf einer Epochenlösung zu betrachten und nur so eine zuverlässige Beurteilung der Epochen möglich ist. Eventuelle Störungen im Konvergenzverhalten, die zu groben Fehlern der Epochenlösungen und somit nach deren Eliminierung zu Datenlücken führen, können durch Adaption (Epoche kürzen bzw. verlängern) bereinigt bzw. egalisiert werden. Im Optimalfall sind mit Low-Cost Einfrequenz-Empfängern auch kurzfristige Bewegungen im Millimeterbereich zuverlässig detektierbar.

## **Abstract**

The intention of this thesis is to demonstrate the potential of GNSS single-frequency receivers with carrier phase output in monitoring systems for engineering geodesy applications. For this reason cost-effective systems have been analyzed concerning design and realization in order to detect slow movements reliably using PDGNSS processing techniques. Main focus of attention is the use of cost-efficient receivers (at the reference as well as on rover side), data processing with available standard baseline processing tools and a supplementary data evaluation with the purpose of achieving best possible results automatically in near real time monitoring applications.

Due to long-term operation in pilot studies of the low-cost GNSS monitoring system, developed by Institute of Geodesy at the University of the Federal Armed Forces of Germany in Munich (UniBwM) – the so called GeoSN – the suitability of the system could be verified and representative data for extensive analysis of a cost-effective GNSS monitoring system is obtained.

The initially theoretically presented models and procedures for obtaining more accurate and reliable results were integrated into the low-cost GNSS monitoring system GeoSN. In terms of practical use it was an objective that the work flow is fully automated.

Empirical studies show significant improvements which clearly demonstrate the potential of cost-effective GNSS monitoring systems by a thoroughly choice of sensors and by an additionally configured and implemented data analysis. Multi-GNSS evaluation, network adjustment as well as a supplementary evaluation including methods of time series analysis have to be specified as the main possibilities for improvements. The quality of the results of the investigated baseline processors can be increased by supplementary added processing features. However, results have always to be scrutinized critically – a high quality assessment is only feasible, if the whole process how each single epoch was processed is examined. Potential disturbances in the convergence of the solution lead to gross errors and data gaps after their elimination which can be adjusted by adapting epochs (shortening or lengthening). In optimal conditions short term movements in the millimeter range can reliably be detected with low-cost single-frequency receivers.

# 1 Einleitung

Mit der Ent- und Weiterentwicklung von satellitengestützten Messverfahren erfolgt die Bestimmung von Veränderungen überwachter Objekte in Form von Positionsänderungen diskreter Punkte durch wiederkehrende Messung ihrer 3D Koordinaten. Zur genauen satellitengestützten Bestimmung war bisher geodätisches Equipment nötig, welches dazu führte, dass dieses Messverfahren oft nur zu wenigen Zeitpunkten und nur an wenigen ausgewählten Punkten eines zu überwachenden Objektes angewendet wurde. Um jedoch beispielsweise einen Hang an einer Vielzahl repräsentativer und ggf. auch potentiell gefährlichen Stellen permanent überwachen zu können, besteht der Wunsch nach einer günstigeren Alternative der einzusetzenden, permanent zu installierenden Sensorik.

Daher wird seit einigen Jahren die Eignung von sogenannten Low-Cost GNSS Empfängern (Einfrequenz-Empfängern), welche weniger Kanäle für die GNSS Signale aufweisen und somit nicht nur günstiger sind, sondern auch weniger Strom benötigen und damit dem Wunsch nach einem batteriegestützten Betreiben gerecht werden, untersucht. Entsprechende Low-Cost GNSS Monitoring-Systeme sind bereits entwickelt. Diese beruhen auf einer Auswertung der Trägerphasenmessung in Near Realtime.

Um eine vergleichbare Genauigkeit wie mit den High-End Ausrüstungen zu erreichen, sind diverse Faktoren zu berücksichtigen. Neben den Einflüssen der Atmosphäre ist der Mehrwegeeinfluss von entscheidender Bedeutung für die Genauigkeit der Ergebnisse. Auch wenn Verfahren bzw. Modelle zur Minderung des Mehrwegeeinflusses und der Troposphäre bekannt sind, so werden diese (teilweise) noch nicht ausreichend in den Softwarelösungen umgesetzt bzw. laufen nicht automatisiert ab. Dies ist jedoch elementar, um mit High-End Systemen vergleichbare Ergebnisse zu erreichen. Ziel ist es daher, ein System mit einer Software zu entwickeln, bei der kein Expertenwissen zur Benutzung notwendig ist und bei der die für ein geodätisches Monitoring erforderlichen Genauigkeiten erreichbar sind.

Wenige der entwickelten Low-Cost Systeme sind bisher im permanenten Praxisbetrieb getestet. Nur anhand solcher Einsätze sind die Potentiale und Restriktionen von Low-Cost GNSS Monitoring-Systemen zu beurteilen und zu verbessern. Im Rahmen dieser Arbeit werden anhand der Erfahrungen dreier Projekte (Hangüberwachung am Hornbergl und am Sudelfeld sowie Überwachung eines Schiffshebewerks in Scharnebeck), welche mit dem an der Universität der Bundeswehr München (UniBwM) entwickelten Low-Cost GNSS Monitoring-System (GeoSN) beobachtet wurden, die einzelnen Einflussgrößen auf ein Low-Cost GNSS System untersucht. Die vorgestellten Modelle und Verfahren zur Optimierung wurden in den Auswerteprozess eingearbeitet und laufen automatisiert.

Des Weiteren sind genauigkeits- und zuverlässigkeitssteigernde sowie kostenminimierende Faktoren dargestellt und untersucht.

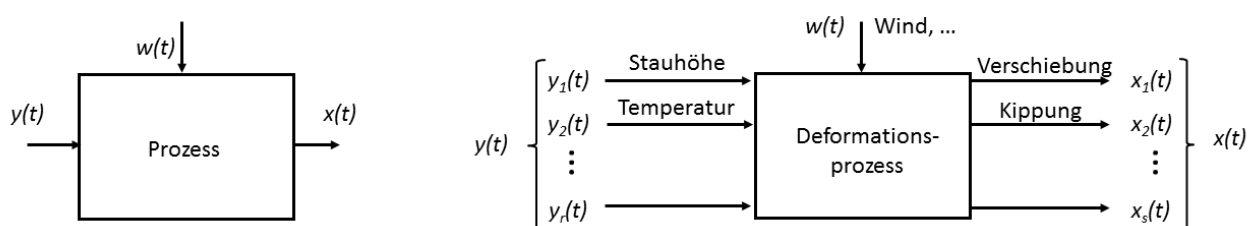
Kapitel 2 beschäftigt sich mit der Differenzierung der Begriffe Monitoring, geodätische Monitoring-Systeme, GNSS Monitoring, kosteneffizient vs. Low-Cost und Qualitätsmerkmalen. In Kapitel 3 werden die wesentlichen Einflussgrößen beim GNSS Monitoring näher betrachtet, die von der Messung bis hin zur Aussage über eine Bewegung Einfluss haben. In Kapitel 4 werden das an der Universität der Bundeswehr entwickelte Low-Cost GNSS Monitoring-System sowie dessen bisherige Projekteinsätze vorgestellt. Ferner werden weitere Low-Cost GNSS Monitoring-Systeme präsentiert und die Unterschiede und Gemeinsamkeiten erläutert. Anhand der in Kapitel 4 bei den Projekten festgestellten sowie aufgrund anderer bekannter Restriktionen, gibt Kapitel 5 einen Überblick über Möglichkeiten zur Optimierung. Die Auflistung erfolgt unterteilt in Ansatz (Netzdesign), Erfassung (Epochenlänge und GNSS Sensorik) sowie Auswertung (GNSS Auswertesoftware und supplementäre Auswertung) und stellt den Status Quo dar, aufgrund dessen die Systemoptimierungen zweckdienlich sind. Diese werden vorgestellt und anhand repräsentativer Projektdaten verifiziert. Abschließend erfolgen in Kapitel 6 eine zusammenfassende Betrachtung und ein Ausblick.

## 2 Begriffe

### 2.1 Monitoring in der Geodäsie

Unter Monitoring versteht man in der Geodäsie die Überwachung bzw. Beobachtung von natürlichen und künstlichen Objekten (wie z.B. Rutschhänge oder Bauwerke) an denen z.B. aufgrund von Änderungen des Untergrundes, ab- oder zunehmenden Belastungen, Änderungen der Materialeigenschaften oder durch andere Ursachen, geometrische Veränderungen zu erwarten, zu vermuten oder bereits aufgetreten sind.

Die Überwachung kann zur frühzeitigen Erkennung von Gefahren, vorbereitend oder begleitend bei der Ausführung einer geplanten Baumaßnahme oder im Zuge eines erforderlichen Warnsystems erfolgen. Da es sich i.d.R. um geometrische Veränderungen der Erde handelt, spricht man auch vom Geomonitoring (GLABSCH ET AL. 2011B) oder Deformationsmonitoring, sowie bei der Überwachung von Bauwerken bzw. dem Zustand von Strukturen auch vom SHM (Structural Health Monitoring). Dabei interessiert zunehmend nicht mehr nur die deskriptive Sichtweise, bei der Zustandsänderungen lediglich rein geometrisch beschrieben werden, ohne explizit nach den ursächlichen Einwirkungen (Trigger) zu fragen, sondern zunehmend auch die kausale Sichtweise, bei der relevante Einflussgrößen explizit in die Modellbildung mit einbezogen und direkt oder zumindest indirekt bestimmt werden (vgl. EICHHORN 2012). In diesem Fall ist ein Prozess zu erfassen, der aus Ursache, Wirkung und Reaktion besteht. Neben den Eingangsgrößen  $y(t)$  und den Ausgangsgrößen  $x(t)$  sind auch mögliche Störgrößen  $w(t)$  sowie Korrelationen (Eingangsgrößen können z.B. Einfluss auf das Objekt und auf das Messsystem haben) zu beachten (vgl. Abbildung 1).



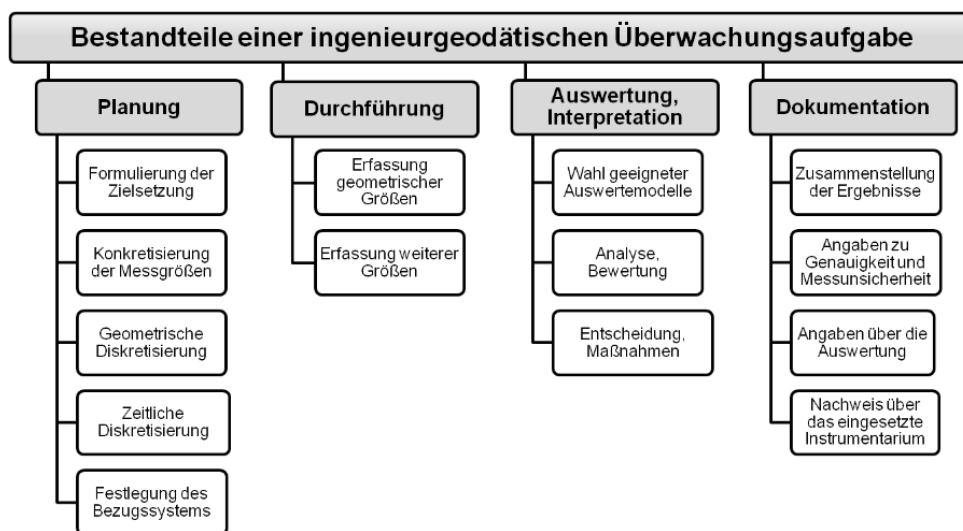
**Abbildung 1: Eingangs-, Stör- und Ausgangsgrößen eines Prozesses - links: allgemein, rechts: am Beispiel Bauwerk (NEUNER UND HEUNECKE 2012)**

Die zur Überwachung zur Verfügung stehende Messsensorik ist vielfältig und deren Auswahl abhängig von der jeweiligen Anwendung. Möglich ist eine Unterteilung in geodätische und geotechnische Messsensoren. Oft ist eine Kombination beider Arten von Sensoren sinnvoll. Während geotechnische Messsensoren wie z.B. Extensometer und Piezometer Eigenschaften im Lokalen messen, können geodätische Messsensoren wie z.B. Tachymeter, Nivelliere und satellitengestützte

Messverfahren mögliche Bewegungen in Lage und/oder Höhe georeferenziert erfassen. Damit können Veränderungen unmittelbar durch Koordinaten in einem übergeordneten Bezugssystem angegeben werden.

Das zu überwachende Objekt und sein Verhalten sind in Raum und Zeit durch eine festzulegende Anzahl an Messpunkten sowie deren repräsentativen Ort (geometrische Diskretisierung) und die Zeitabstände der wiederkehrenden Bestimmung (zeitliche Diskretisierung) zu approximieren (HEUNECKE ET AL. 2013). Beides ist entsprechend dem Vorwissen über das Objekt so festzulegen, dass eine Beschreibung des Deformationsverhaltens möglich und dabei der Kosten-Nutzeneffekt berücksichtigt ist. Bei der zeitlichen Diskretisierung unterscheidet die DIN 18710-4 (2010) zwischen kontinuierlicher, diskontinuierlicher und periodischer Überwachung. Es gilt, sowohl sprunghafte Änderungen, Trends und periodische Vorgänge zu erfassen. Insbesondere für unregelmäßige Vorgänge ist eine kontinuierliche Beobachtung essentiell, da epochale Messungen (diskontinuierlich oder periodisch) nur eine Momentaufnahme widerspiegeln können. Dem Anliegen, Objekte räumlich verdichtet, permanent und automatisiert mit präzisen Messverfahren zu beobachten, werden Monitoring-Systeme nach dem aktuellen Stand der Technik gerecht.

Die messtechnische Erfassung stellt dabei jedoch nur einen Teilaspekt einer Monitoring- oder Überwachungsaufgabe dar. Diese umfasst nach DIN 18710-4 (2010) vielmehr die Gesamtheit aller notwendigen Maßnahmen von der Planung über die Durchführung bis hin zur Auswertung und abschließender Dokumentation aller Arbeitsschritte und Ergebnisse, die in Abbildung 2 zusammenfassend dargestellt sind.



**Abbildung 2: Notwendige Maßnahmen von Monitoring- oder Überwachungsaufgaben nach THUT (2008) und DIN 18710-4 (2010)**



## 2.2 Geodätische Monitoring-Systeme

Ein geodätisches Monitoring-System dient nach STEMPFHUBER 2009 zur Erfassung, Beobachtung und Auswertung von geometrischen Objektveränderungen. Dies erfolgt vorherrschend mit geodätischen Messverfahren, deren Beobachtungsgrößen ein-, zwei- oder dreidimensionale Koordinatenänderungen, Neigungsänderungen in Längs- und/oder Querausrichtung oder Änderungen der Orientierung des betrachteten Objekts sind. Durch die Integration von geotechnischen Messensoren lassen sich Einflussgrößen und Zusatzinformationen wie z.B. Temperatur und Druck gewinnen, anhand derer durch die Analyse von Kausalitäten die Plausibilität der gemessenen Objektänderungen kontrolliert und die Zuverlässigkeit (im geodätischen Sinne, vgl. Abschnitt 3.5.2) erhöht werden kann.

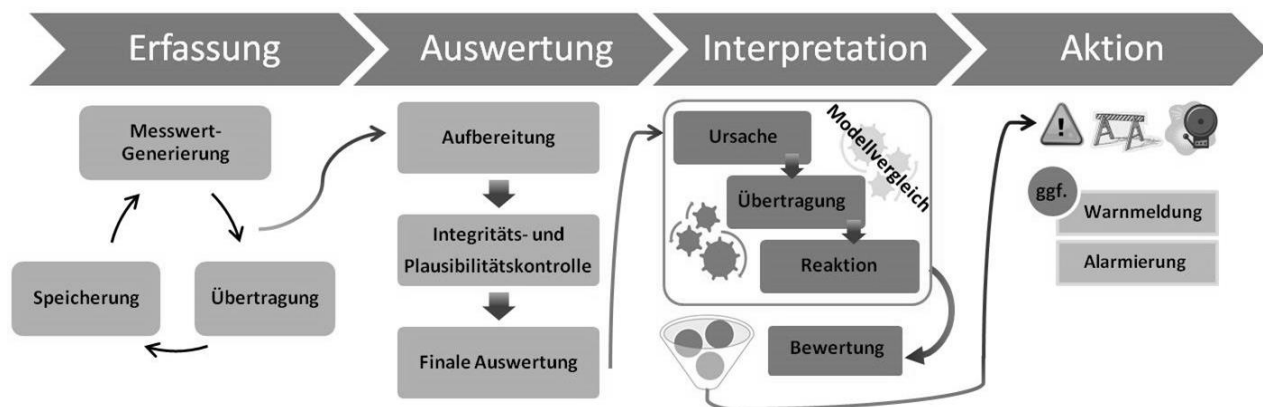


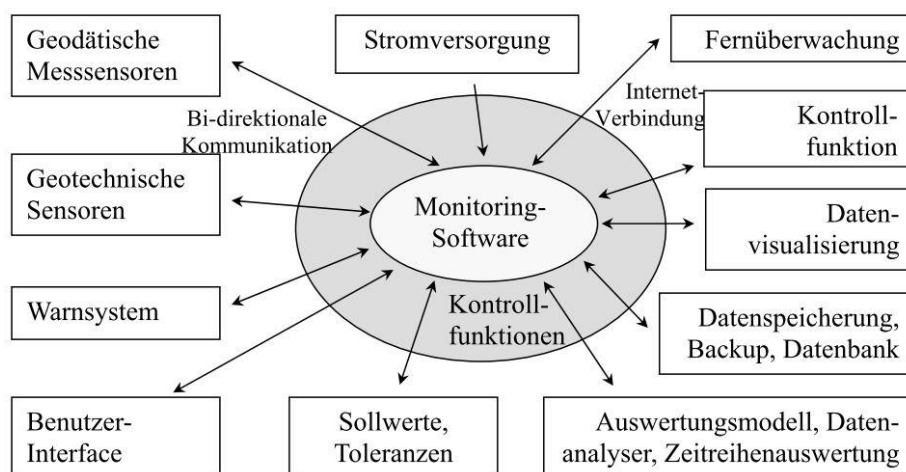
Abbildung 3: Prozesskette eines Monitoring-Systems

Die Hauptbestandteile der Prozesskette eines Monitoring-Systems sind Datenerfassung, Auswertung, Interpretation und Aktion (vgl. Abbildung 3). Der Teilprozess der Datenerfassung gliedert sich im Wesentlichen in Datengenerierung, Speicherung und Übertragung an den Auswerterechner, wobei die Reihenfolge letzterer unterschiedlich sein kann; d.h. (Zwischen-) Speicherung am Messsensor und anschließende Übertragung oder unmittelbare Übertragung und zentrale Speicherung. Die Auswertung umfasst im Wesentlichen eine Messdatenaufbereitung (u.a. Konvertierung der Datenformate), eine Integritäts- und Plausibilitätskontrolle (u.a. Ausreißereliminierung) sowie die finale Datenanalyse (speziell Zeitreihenanalyse). Im Zuge der Interpretation erfolgt eine Bewertung der Ergebnisse u.a. auf Grundlage eines Modellvergleichs unter Hinzunahme externer Daten und unter Berücksichtigung des erwarteten natürlichen Objektverhaltens (z.B. Tages- und Jahresgänge). Zum Abschluss der Prozesskette erfolgt im Modul Aktion ein Vergleich der detektierten und verifizierten Objektveränderung mit den vorgegebenen Grenzwerten sowie ggf. eine

daraus resultierende Aktion. Treten keine Auffälligkeiten auf, muss keine Maßnahme erfolgen, die Ampel bleibt bildlich gesprochen auf grün. Bei einer Annäherung an einen Schwellwert oder z.B. bei starker Bewegungsänderung sollte eine Warnmeldung erfolgen, die Ampel schaltet auf gelb. Bei Überschreitung eines Schwellwertes wird vom System eine entsprechende Alarmierung ausgelöst, die Ampel springt auf rot.

Im Optimalfall läuft die beschriebene Prozesskette automatisiert und weitestgehend ohne Nutzerinteraktionen ab. Die Entscheidungslogik, auf deren Grundlage das System ggf. eine Alarmierung vornimmt, basiert auf Expertenwissen und Erfahrungen (aus oftmals verschiedenen Fachdisziplinen) und muss mit Hilfe entsprechender Modelle auf das Monitoring-System bzw. die Monitoring-Software übertragen werden. Je besser dies in jedem einzelnen (Anwendungs-) Fall gelingt, desto stärker wird diese sogenannte „schwache künstliche Intelligenz (KI)“ in die Prozesskette eingebracht. Das Ziel einer wirklich „starken KI“, bei der der Computer bzw. der Entscheidungsfindungsprozess nicht nur Intelligenz simuliert, sondern tatsächlich intelligent ist (WEB 1), bedarf nach dem aktuellem Stand der Forschung und Entwicklung noch weiterer Anstrengungen. Ein automatisierter Entscheidungsfindungsprozess beruht daher aktuell meist auf einem dem Programm zu Grunde liegenden Regelwerk bzw. Katalog an Entscheidungskriterien.

STEMPFHUBER 2009 vergleicht die Monitoring-Software mit einem Marktplatz, an dem alle Informationen zusammenfließen und koordiniert bzw. interpretiert werden, siehe Abbildung 4. Ferner wird dargestellt, dass eine Vielzahl an Komponenten für die Realisierung der Prozesskette notwendig sind, die sich in die Kategorien Sensorik, Infrastruktur (Kommunikation und Powermanagement) und Software einteilen lassen.



**Abbildung 4: Komponenten geodätischer Monitoring-Systeme (STEMPFHUBER 2009)**

Bei der Auswahl der Hard- und Softwarekomponenten ist darauf zu achten, dass diese die Anforderungen wie z.B.

- hoher Automatisierungsgrad,
- permanente Datenverfügbarkeit (Sicherstellung von Kommunikation und Stromversorgung),
- Anpassung an die individuellen Bedürfnisse der Objektüberwachung (modularer Aufbau),
- Sicherstellung ausreichender Rechen- und Speicherkapazität und
- Zuverlässigkeit des Gesamtsystems im Betrieb (Selbstkontrolle, Möglichkeit der Fernwartung)

erfüllen. Die technische Umsetzung heutiger geodätischer Monitoring-Systeme weist somit sehr enge Parallelen zu Sensornetzen auf. Ein Sensornetz besteht nach SOHRABY ET AL. 2007 aus:

- automatisiert und autark arbeitenden Sensoren – den Sensorknoten,
- einem verbindenden Kommunikationsnetzwerk,
- einer zentralen Station der Datenzusammenführung und -aufbereitung sowie
- geeigneten Softwareprogrammen.

Durch die Nutzung geodätischer Sensorik an den Sensorknoten entsteht ein Übergang zu Geo-Sensornetzen, da der Raumbezug (Geo-Bezug) der erfassten Informationen von zentraler Bedeutung ist und Techniken aus der Geodäsie & Geoinformatik bei der Datenerfassung (Lokalisierung und Referenzierung) und dem Datenhandling (Geo-Informationssysteme, Visualisierungen, ...) Anwendung finden. Während der Grundgedanke bei Sensornetzen meist von einer wahllosen Verteilung zahlreicher, miniaturisierter und ressourcenarmer Sensorknoten im Raum ausgeht, steht bei ingenieurgeodätischen Monitoringaufgaben eine gezielte Adaptierung der auf Dauerhaftigkeit ausgelegten Sensorknoten an repräsentativen Stellen am Objekt im Vordergrund. Die Auswahl der Lage und die Anzahl der zu instrumentierenden Messpunkte am Objekt wird durch das unter den Gesichtspunkten der geforderten Genauigkeit, der erforderlichen Zuverlässigkeit (im geodätischen Sinn vgl. Abschnitt 3.5.2) und dem vertretbaren Aufwand sowie unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen und örtlichen Gegebenheiten (Art und Größe des zu überwachenden Objekts, Gefahrenpotential, Betrag der erwarteten Deformation, geforderte Reaktionszeit, ...) erstellte Messkonzept festgelegt (HEUNECKE 2009). Neben detaillierten Angaben zu den Messverfahren beinhaltet das Messkonzept Vorgaben und Spezifikationen für die zu verwendenden Messsensoren.

## 2.3 GNSS Monitoring

Beim GNSS Monitoring werden Positionsänderungen ausgewählter Messstationen mit Hilfe von globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS) bestimmt. Zu diesen gehören u.a. das amerikanische Global Positioning System (GPS), das russische System GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), das europäische System Galileo, das japanische System QZSS (Quasi-Zenit-Satelliten-System) und das chinesische System Compass/Beidou. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur die Systeme GPS und GLONASS näher betrachtet.

Das Grundprinzip der Positionsbestimmung basiert auf der Messung der sogenannten Pseudostrecken zwischen einem Empfänger und mindestens vier Satelliten. Dazu werden die von den GNSS Satelliten permanent auf den Trägerwellen ausgesendeten Signale ausgewertet, wobei Einfrequenz-Empfänger nur die Frequenz  $L_1$  (bzw.  $G_1$  oder  $E_1$ ) verwenden und Mehrfrequenz-Empfänger zusätzlich weitere, z.B. die Frequenz  $L_2$  (bzw.  $G_2$  oder  $E_2$ ), empfangen können.

Die Definition der einzelnen Frequenzen unterscheidet sich bei den globalen Navigationssatellitensystemen. Beim GPS senden alle Satelliten auf den gleichen Frequenzen, welche sich aus der Grundfrequenz  $f_0 = 10,23 \text{ MHz}$  ableiten lassen und wie folgt definiert sind:

$$\begin{aligned} L_1: \quad f_1 &= 154 \cdot f_0 = 1575,42 \text{ MHz}, & \lambda_1 &= 0,190 \text{ m} \\ L_2: \quad f_2 &= 120 \cdot f_0 = 1227,60 \text{ MHz}, & \lambda_2 &= 0,244 \text{ m} \\ L_5: \quad f_5 &= 115 \cdot f_0 = 1176,45 \text{ MHz}, & \lambda_5 &= 0,255 \text{ m} \end{aligned}$$

Eine Unterscheidung der einzelnen GPS Satelliten erfolgt nach dem CDMA-Verfahren (Code Division Multiple Access) über die Modulierung verschiedener Codes.

Bei GLONASS lassen sich die einzelnen Satelliten auf Basis des FDMA-Verfahrens (Frequency Division Multiple Access) differenzieren, indem jedem Satelliten die Frequenzen in Abhängigkeit der Nummer des Frequenzkanals  $k$  ( $k = -7, -6, \dots, 4$ ) wie folgt zugewiesen werden:

$$\begin{aligned} L_1 \text{ oder } G_1: \quad f_1 &= 1602,000 + k \cdot 0,5625 \text{ MHz}, & \lambda_1 &= 0,187 \text{ m} \\ L_2 \text{ oder } G_2: \quad f_2 &= 1246,000 + k \cdot 0,4375 \text{ MHz}, & \lambda_2 &= 0,241 \text{ m} \end{aligned}$$

Im Zuge der Modernisierung wird mit den GLONASS-K Satelliten eine dritte Frequenz eingeführt sowie eine Erweiterung um CDMA Signale vollzogen (vgl. WEB 2).

$$L_3 \text{ oder } G_3: \quad f_3 = 1204,704 + k \cdot 0,4230 \text{ MHz}, \quad \lambda_3 = 0,249 \text{ m}$$

Zu weiteren Informationen siehe PARKINSSON UND SPILKER 1996, KAPLAN UND HEGARTY 2006, HOFMANN-WELLENHOF ET AL. 2008 sowie WEB 2.

Für die Codemessungen  $C_{a,f}^i$  und die Phasenmessungen  $\phi_{a,f}^i$  eines GNSS Empfängers  $a$  von jedem sichtbaren Satelliten  $i$  auf einer der Frequenzen  $f$  ergeben sich nach WANNINGER 2000B folgende Beobachtungsgleichungen:

$$C_{a,f}^i = R_a^i + c_0 (dt_a - dt^i) + I_{a,f}^i + T_a^i + O_a^i + M_{a,f,C}^i + A_{a,f,C}^i + \varepsilon_{a,f,C}^i \quad (2.1)$$

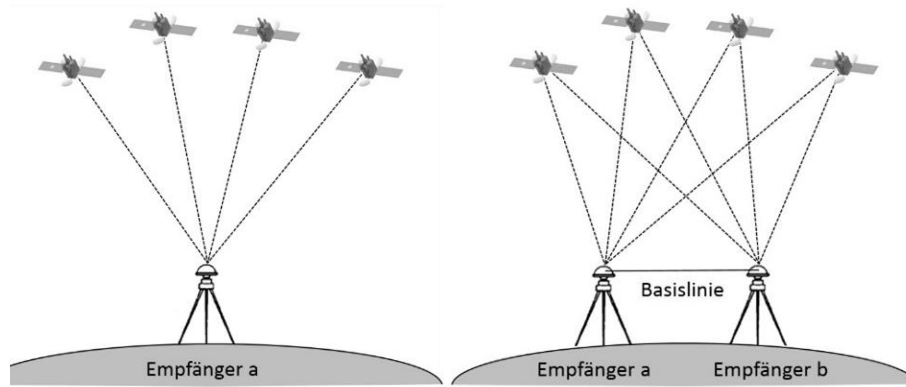
$$\Phi_{a,f}^i = R_a^i + c_0 (dt_a - dt^i) + \lambda_f N_{a,f}^i - I_{a,f}^i + T_a^i + O_a^i + M_{a,f,\phi}^i + A_{a,f,\phi}^i + \varepsilon_{a,f,\phi}^i \quad (2.2)$$

Die Indizes  $C$  (Code) und  $\phi$  (Phase) zeigen die Abhängigkeiten von der Art der Beobachtungsgröße an und es bedeuten

$C_a^i$	- Codemessung [m]
$\Phi_a^i$	- Phasenmessung [m]
$R_a^i =  \vec{X}^i - \vec{X}^a $	- Entfernung Satellit $i$ zu Empfänger $a$ [m]
$\vec{X}^i, \vec{X}^a$	- Vektoren globaler kartesischer Koordinaten $X, Y, Z$ [m]
$c_0$	- Vakuumlichtgeschwindigkeit [m/s]
$dt_a$	- Empfängeruhrfehler [s]
$dt^i$	- Satellitenuhrfehler [s]
$\lambda$	- Wellenlänge der jeweiligen Frequenz [m]
$N_a^i$	- Phasenmehrdeutigkeit [ / ]
$I_a^i$	- Laufzeitfehler aufgrund ionosphärischer Refraktion [m]
$T_a^i$	- Laufzeitfehler aufgrund troposphärischer Refraktion [m]
$O_a^i$	- Orbitfehler [m]
$M_a^i$	- Mehrwegeausbreitungsfehler [m]
$A_a^i$	- Exzentrizität des Antennenphasenzentrums [m]
$\varepsilon_a^i$	- zufällige Messfehler [m].

Die Beobachtungsgleichungen für die Code- und die Phasenmessung (vgl. Formel 2.1 und Formel 2.2) unterscheiden sich in der Mehrdeutigkeit der Phase und dem Vorzeichen des aufgrund ionosphärischer Refraktion hervorgerufenen Laufzeitfehlers  $I_a^i$ . Mit dem Festsetzen bzw. Lösen der Trägerphasenmehrdeutigkeit ergibt sich eine Fixed Lösung. Wird die Mehrdeutigkeit lediglich geschätzt, resultiert eine Float Lösung. Auf die einzelnen Fehler und die wesentlichen Einflussgrößen auf die Beobachtungsgleichungen beim GNSS Monitoring, ihre Eigenschaften und Auswirkungen wird in Kapitel 3 eingegangen.

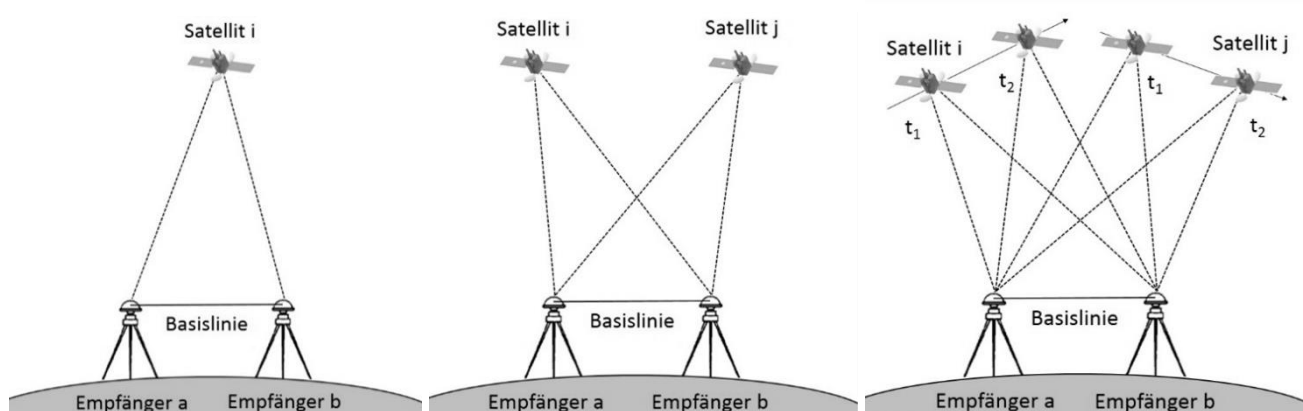
Während mit Codemessungen eine Positionierung mit Genauigkeiten im Bereich einiger Meter erreicht werden kann, können unter Verwendung der Phasenmessungen potentielle Genauigkeiten im Bereich einiger Millimeter erzielt werden.



**Abbildung 5: Absolute und relative Positionierung**

Ferner ist zwischen der absoluten und der relativen Positionsbestimmung zu unterscheiden (vgl. Abbildung 5). Bei der absoluten Positionsbestimmung, auch Point Positioning oder Single Point Positioning (SPP) genannt, werden die Koordinaten eines einzelnen Empfängers bestimmt. Bei einer Augmentierung durch präzise Satellitenbahn- und Satellitenuhrinformationen sowie Zustandsbeschreibungen der Atmosphäre spricht man vom Precise Point Positioning (PPP), bei Verwendung der Trägerphasenmessungen vom Phase Precise Point Positioning (Phase PPP). Aufgrund der bisher erreichbaren Genauigkeiten wird dieses Verfahren noch nicht für Monitoringaufgaben verwendet und aus diesem Grund auch nicht weiter in dieser Arbeit vertieft.

Bei der relativen Positionsbestimmung, auch differentielles GNSS (DGNSS) genannt, werden von mindestens zwei Empfängern simultan Messungen zu mindestens vier gleichen Satelliten durchgeführt. Mittels der bekannten Koordinaten der einen Station erhält man als Ergebnis einen 3D Basislinienvektor zwischen der bekannten Station (Referenzstation oder im Zusammenhang mit Überwachungen auch Stabilpunkt genannt) sowie der unbekannt Station (Objektpunkt oder auch als Rover bezeichnet) und damit die Position letzterer. Bei zusätzlicher Verwendung der Trägerphase, spricht man vom präzisen differentiellen GNSS (PDGNSS).



**Abbildung 6: Differenzbildung beim DGNSS - Einfach-, Zweifach- und Dreifachdifferenz**

Durch Differenzenbildung, siehe Abbildung 6, können beim DGNSS Messabweichungen minimiert bzw. eliminiert und somit eine höhere Genauigkeit als bei der absoluten Positionsbestimmung erreicht werden (vgl. HÄFELE 2011). Bei der Einfachdifferenz, d.h. der Differenz der Beobachtungen von zwei Empfängern  $a$  und  $b$  zum selben Satelliten  $i$  einer Epoche, entfällt der Satellitenuhrfehler  $dt^i$ :

$$\Phi_{ab}^i = \Phi_a^i - \Phi_b^i = \Delta R_{ab}^i + c_0 \Delta t_{ab} + \lambda \Delta N_{ab}^i + \Delta \delta_{ab}^i \quad (2.3)$$

mit  $\Delta \delta_{ab}^i = -\Delta I_{ab}^i + \Delta T_{ab}^i + \Delta O_{ab}^i + \Delta M_{ab}^i + \Delta A_{ab}^i + \Delta \varepsilon_{ab}^i$

Doppeldifferenzen sind Differenzen zwischen den Beobachtungen von zwei Empfängern  $a$  und  $b$  zu zwei Satelliten  $i$  und  $j$  derselben Epoche (entspricht der Differenz aus zwei Einfachdifferenzen) und führen zur Eliminierung des Empfängeruhrfehlers:

$$\Phi_{a,b,f}^{ij} = \Phi_{a,b,f}^i - \Phi_{a,b,f}^j = \Delta R_{ab}^{ij} + \lambda \Delta N_{ab}^{ij} + \Delta \delta_{ab}^{ij} \quad (2.4)$$

Das Ergebnis einer dreifachen Differenzenbildung wird erhalten als die Differenz zwischen der doppelten Differenz zu einer Epoche  $t_1$  und derselben doppelten Differenz zu einer anderen Epoche  $t_2$ . Die unbekannte Mehrdeutigkeit wird dabei eliminiert; es ergibt sich:

$$\Phi_{a,b,f}^{ij}(t_1) - \Phi_{a,b,f}^{ij}(t_2) = \Delta R_{ab}^{ij}(t_1) - \Delta R_{ab}^{ij}(t_2) + \Delta \delta_{ab}^{ij}(t_1) - \Delta \delta_{ab}^{ij}(t_2). \quad (2.5)$$

Ferner lässt sich bei den Methoden der Positionsbestimmung zwischen einer statischen (Empfänger unbewegt) und einer kinematischen Anwendung (Empfänger bewegt) sowie in Abhängigkeit des Auswertzeitpunktes zwischen Echtzeit- und Postprocessing-Verfahren unterscheiden. Während bei der Echtzeit-Prozessierung das unmittelbar zur Verfügung stehen der Positionslösung ein großer Vorteil ist, ermöglicht die Postprocessing-Auswertung aufgrund umfangreicherer Berechnungsalgorithmen und Auswertoptionen sowie der Möglichkeit zur vorgeschalteten detaillierten Datenaufbereitung höhere Genauigkeiten. Das sogenannte Near Realtime Processing (NRTP) vereint die Vorteile beider Verfahren und zeichnet sich durch eine selbst gestaltbare Postprocessing Auswertung der Rohdaten (Trägerphasenmessungen etc.) aus, die in unmittelbarem Anschluss an ein definiertes, relativ kurzes Aufzeichnungsintervall (z.B. 15 Minuten) erfolgt und womit höherwertige Positionslösungen in „Nahe Echtzeit“ vorliegen. Nachfolgend werden die aufeinanderfolgenden Aufzeichnungsintervalle als (Mess-)Epochen bezeichnet, wobei diese nicht mit der oben genannten (Einzel-)Epoche zu verwechseln sind. Eine (Mess-)Epoche mit einer Epochendauer von beispielsweise 15 Minuten besteht bei einer Datenrate von 1 Hz aus 900 (Einzel-)Epochen. Bei der gemeinsamen Auswertung dieser 900 (Einzel-)Epochen entsteht ein Epochenergebnis.

Erfolgt eine NRTP-Auswertung im statischen Modus, wird während der (Mess-)Epoche dem zu überwachenden Objekt in diesem Zeitraum keine, bzw. nur eine sehr geringe Bewegung (Empfänger quasistatisch) unterstellt. Etwaige Veränderungen während dieses Zeitraumes werden wie bei einer Tiefpassfilterung zu einer Positionsangabe gemittelt. Aus diesem Grund kommt für diesen Auswerteansatz eigentlich nur die Überwachung von kontinuierlichen und langsamen Bewegungen, wie dies bei Hangrutschungen typischerweise der Fall ist, in Frage. Bei sprunghaften oder ruckartigen Bewegungen hingegen ist entsprechend kritisch zu hinterfragen, ob sich der Auswerteansatz mit dem erwarteten Versagensmechanismus des überwachten Prozesses in Einklang bringen lässt. Bei einer Hangrutschung, bei der die instrumentierten Objektpunkte Bewegungen beispielsweise in der Größenordnung von 1 m pro Jahr aufweisen, kann während einer Epoche von 1 Stunde ein quasistatischer Fall unterstellt werden, da bei einer kontinuierlichen Bewegung in diesem Zeitraum die Objektverschiebung bei unter 0,12 mm liegt. Eine sprunghafte Veränderung würde um eine (Mess-)Epoche zeitverzögert festgestellt werden können.

Neben der Nutzung von GNSS Empfängern zur präzisen Positionsbestimmung in einem Monitoring-System können die Satellitensignale zur Synchronisation von Sensoren in einem Überwachungssystem herangezogen werden. Die GPS Systemzeit, die von einem Uhrenensemble der Master-Kontroll- und zahlreicher global verteilter Monitor-Stationen abgeleitet wird und eine kontinuierliche Zeitskala ohne Schaltsekunden mit Nullpunkt am 06.01.1980 00:00Uhr darstellt, kann bei den meisten industriellen Empfängern über einen separaten Ausgang als Puls pro Sekunde (PPS) abgegriffen werden und weist eine Genauigkeit von 1 Mikrosekunde oder besser auf. Die aktuelle Differenz zur Koordinierten Weltzeit (Universal Time Coordinated UTC), die sich an der Erdrotation orientiert und über Schaltsekunden zur GPS-Zeit in regelmäßigen Abständen angeglichen wird, liegt am 01.01.2017 bei +18 s (GPS = UTC +18 s). Über den in der Navigationsnachricht mit versendeten, aktuellen Zeitoffset ist jeder GNSS Empfänger in der Lage, die UTC-Zeit zu berechnen. Anders als GPS, Galileo oder BeiDou, schließt das GLONASS Zeitsystem Schaltsekunden mit ein, wodurch sich ein verändernder Offset zwischen GPS- und GLONASS-Zeit ergibt.



## 2.4 Kosteneffizient vs. Low-Cost

Effizienz ist nach DIN EN ISO 9000 (2005) das Verhältnis zwischen dem erzielten Ergebnis und den eingesetzten Mitteln und somit ein Vergleich zwischen einem definierten Nutzen und dem Aufwand, der zu dessen Erreichen notwendig ist. Je höher der Nutzen und je niedriger die hierfür erwarteten bzw. entstandenen Kosten unter Berücksichtigung weiterer Aspekte, desto kosteneffizienter ist bzw. war die Maßnahme.

Effektivität (bzw. Wirksamkeit) hingegen ist laut DIN EN ISO 9000 (2005) ein Ausmaß, in dem geplante Tätigkeiten verwirklicht und geplante Ergebnisse erreicht wurden. Die Art und Weise der Zielerreichung wird dabei nicht betrachtet. Somit ist Effizienz ein Maß für die Wirtschaftlichkeit (Kosten-Nutzen-Relation) und Effektivität lediglich ein Maß für die Zielerreichung. Aus Gründen des Wettbewerbs besteht das Bestreben, die Kosteneffizienz zu steigern, indem beispielsweise die Kosten bei gleichbleibendem Nutzen reduziert werden.

Für die Entscheidung, ob das Ergebnis (der Nutzen) einer Aktion deren Aufwand (die Kosten) rechtfertigt, kann die Kosten-Nutzen-Analyse herangezogen werden. Für die Vergleichbarkeit werden der erwartete Nutzen sowie die Kosten normalerweise in Geldeinheiten gemessen. Dies bereitet vor allem bei der Bewertung von nicht am Markt gehandelten Gütern (Menschenleben, Zeit, viele Umweltgüter etc.) sowie bei schwierig zu quantifizierenden qualitativen Nutzen (Image, Kundenzufriedenheit, Qualität, Mitarbeiterzufriedenheit, Klimaschutz etc.) Probleme (vgl. WEB 3).

Der Nutzen eines Monitoring-Systems ist von (Qualitäts-)Kriterien wie Genauigkeit, Echtzeitfähigkeit, Zuverlässigkeit sowie von der zeitlichen und räumlichen Auflösung von Bewegungsvorgängen durch das System abhängig und lässt sich aus oben genannten Gründen nur bedingt in monetären Einheiten angeben. Ziel eines Monitoring-Systems ist es, eine vermutete Bewegung entsprechend ihrer erwarteten räumlichen und zeitlichen Dimension ausreichend schnell, zuverlässig und genau zu bestimmen. Je nach prognostizierter Schadensgröße bzw. -potential, dem Erkenntnisgewinn über die Bewegung oder weiteren Aspekten wie dem Sicherheitsgewinn (z.B. für die Bevölkerung), ergibt sich für das Monitoring-System ein individuell zu bewertender Nutzen.

Die Kosten eines Monitoring-Systems setzen sich zusammen aus einmaligen Aufwendungen für die Systemkonzeption, die Hard- und Softwarekomponenten und für die Installation sowie wiederkehrenden Ausgaben für die Wartung und den laufenden Betrieb. Ein mögliches Einsparpotential ist bei den Investitionskosten bzgl. der Aufwendungen für Hard- und Software gegeben.

Geringere Investitionskosten pro Messpunkt ermöglichen bei unverändertem Budget eine höhere Punktdichte an den zu überwachenden Objekten, wodurch sich eine integrale Aussage zum Objektverhalten leichter erzielen lässt. Ferner können bei einem nur kleinen Budget auf diese Weise

Bauwerke und natürliche Objekte überhaupt erst kontinuierlich beobachtet werden, wo dies prinzipiell zwar zu fordern ist, aber aus Kostenerwägungen bisher unterbleibt bzw. nur eingeschränkt, z.B. durch sporadische Messungen, erfolgt. Die Reduktion der Kosten kann in pragmatischer Sicht außerdem zu einem vertretbareren Risiko in Bezug auf Diebstahl, Vandalismus oder Verlust durch ein Schadensereignis (z.B. Verlust des Sensors durch die aufgetretenen Veränderungen) führen.

Der Begriff „Low-Cost“ bedeutet übersetzt preiswert, kostengünstig oder im allgemeinen Sprachgebrauch billig, wobei der Begriff „billig“ negativ behaftet ist. Bei „Low-Cost GNSS Monitoring-Systemen“ sollte nicht die alleinige Reduktion der Kosten im Vordergrund stehen, sondern vielmehr eine ausgewogene Kosten-Nutzen-Relation und damit das Ziel einer Steigerung der Kosteneffizienz. Aus diesem Grund ist es treffender von kosteneffizienten GNSS Monitoring-Systemen zu sprechen. Jedoch wird der Begriff „Low-Cost“ häufig verwendet, um den Fokus auf kostengünstig zu unterstreichen.

In dieser Arbeit steht das Einsparpotential bzgl. GNSS Sensorik und GNSS (Auswerte-)Software (vgl. Abschnitt 5.2.3 und 5.2.4) im Mittelpunkt. Die GNSS Sensorik unterteilt sich in Empfänger und Antenne, wobei die Antenne entweder mit dem Empfänger in gekapselter Bauweise vereint (sogenannte Enclosures) oder als eigenständiges externes Element an den Empfänger angeschlossen wird. Während die Enclosures aufgrund ihrer Bauweise unmittelbar den äußeren Bedingungen ausgesetzt sind, kann bei einer Trennung von Empfänger und Antenne zumindest der Empfänger in einer entsprechend isolierten separaten Einhausung besser vor widrigen Umgebungsbedingungen geschützt werden. Ferner bietet die Trennung grundsätzlich mehr Flexibilität bzgl. des Einsparpotentials, da am Markt verfügbare Empfänger und Antennen frei gewählt und kombiniert werden können. Somit kann eine auf das Projekt bezogene optimale Sensorauswahl erfolgen und der Einsatz sogenannter Development Kits, bei denen man ein ungekapseltes Sensorboard zu deutlich günstigeren Konditionen erhält, um dieses in eigens konzipierte Systeme zu integrieren, ist ebenfalls denkbar.

Allgemein können GNSS Empfänger in die Kategorien Handheld, GIS und Geodetic (SCHWIEGER 2003), Low-Cost, Geodata Acquisition und Geodetic (SCHWIEGER UND GLÄSER 2005) bzw. Navigation und Geodetic (WESTON UND SCHWIEGER 2010) eingeteilt werden. Als Low-Cost GNSS Empfänger werden nach gegenwärtigem Stand Einfrequenz-Empfänger bezeichnet, die eigentlich für Navigationsanwendungen und den Massenmarkt entwickelt wurden. Sie besitzen i.d.R. keine Displays, verfügen über weniger Empfangskanäle, ermöglichen weder eine Speicherung noch eine Qualitätskontrolle der Daten und zeichnen sich durch einen geringen Energieverbrauch aus. Die Kosten eines Low-Cost GNSS Empfängers belaufen sich auf einem Bruchteil von denen für einen

üblicherweise bei Monitoring-Aufgaben verwendeten geodätischen Empfänger und werden, sofern sie die Möglichkeit der Rohdatenausgabe haben, zunehmend für Anwendungen verwendet, wie die ingenieurgeodätische Überwachung von

- Vulkanen (RIZOS ET AL. 1999, DRESCHER 2013),
- Hängen (MANETTI UND KNECHT 2000),
- Gletschern (LIMPACH 2009),
- Brücken (COSSER ET AL. 2004),
- Talsperren (BÄUMKER ET AL. 2000),
- Tagebaugruben (BOND 2007) und
- Wellenbrechern / Hafendämmen (DEL GROSSO ET AL. 2003) sowie
- für die Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten von Gewässern (ALBERT ET AL. 2010).

Die Höhe der Investitionskosten für die GNSS Antennen ist davon abhängig, ob es sich um Ein- oder Mehrfrequenz-Antennen handelt, Informationen über das Phasenzentrum vorliegen und ob sie eine Grundplatte oder Chokerringe besitzen.

Der Einsatz von Low-Cost GNSS Sensorik bedingt eine umfangreichere und aufwändigere, den Projektbedingungen angepasste Auswertung, um vergleichbare Ergebnisse wie mit High-End Sensorik erzielen zu können. Verfügbare Lösungen wie oben genannt, versuchen durch Einbindung spezieller Algorithmen die Restriktionen, die ein Low-Cost GNSS Monitoring-System zwangsweise mit sich bringt, für den jeweiligen Anwendungsfall bestmöglich zu egalisieren. In Kapitel 4 werden als Beispiele das GeoSN (Geo-Sensornetzwerk), welches am Institut für Geodäsie an der Universität der Bundeswehr München (UniBwM) entwickelt wurde, detailliert und eine Auswahl weiterer Low-Cost GNSS Monitoring-Systeme mit ihren wichtigsten Eigenschaften vorgestellt.

## 2.5 Qualitätsmerkmale

Qualität ist nach DIN EN ISO 9000 (2005) ein Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale (kennzeichnende Eigenschaften qualitativer oder quantitativer Natur) Anforderungen (Erfordernisse oder Erwartungen) erfüllt. Dabei gibt es verschiedene Klassen von Merkmalen wie z.B.

- physikalische (mechanisch, elektrisch, chemisch, biologisch),
- sensorische (Geruch, Berührung, Geschmack, Gehör),
- verhaltensbezogene (Anständigkeit, Ehrlichkeit),
- zeitbezogene (Pünktlichkeit, Verlässlichkeit, Verfügbarkeit),

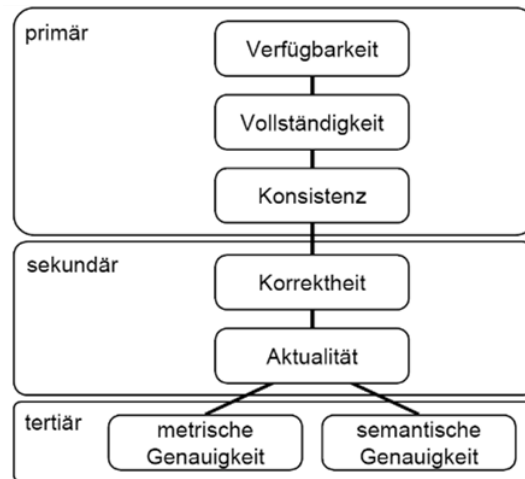
- ergonomische (z.B. physiologische oder auf Sicherheit von Menschen bezogene Merkmale) oder
- funktionale (z.B. Spitzengeschwindigkeit eines Fahrzeuges).

In der Geodäsie wird zwischen Genauigkeit und Zuverlässigkeit unterschieden. Während die Genauigkeit in diesem Sinne angibt, wie präzise ein Wert bestimmt wurde, bezieht sich die Zuverlässigkeit auf die inhärenten Kontrollmöglichkeiten der Ergebnisse (vgl. Abschnitt 3.5.2). Die DIN EN ISO 9000 (2005) hingegen definiert Zuverlässigkeit als „zusammenfassender Ausdruck zur Beschreibung der Verfügbarkeit und ihrer Einflussfaktoren Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft“. Ein weiteres Qualitätsmerkmal für ingenieurgeodätische Überwachungsnetze ist die Sensitivität, welche die Fähigkeit beschreibt, mit der sich die Koordinatenänderungen eines Punktes oder einer Punktgruppe statistisch nachweisen lassen (HEUNECKE ET AL. 2013).

WILTSCHKO 2004 nennt im Kontext von Fahrerassistenzsystemen als Qualitätsmerkmale für Informationen Verfügbarkeit, Aktualität, Vollständigkeit, Konsistenz, Korrektheit sowie Genauigkeit (metrische und semantische). In HEUNECKE ET AL. 2013 werden diese in die Gruppen Zuverlässigkeits-, Integritäts- und Genauigkeitsmerkmale eingeteilt. Zuverlässigkeitsmerkmale, wobei Zuverlässigkeit hier nicht im geodätischen Sinne gemeint ist, sind Verfügbarkeit und Aktualität. Während Verfügbarkeit bedeutet, dass eine Information zu ihrer beabsichtigten Nutzung an einer bestimmten Stelle bereitstehen muss, ergänzt Aktualität die Verfügbarkeit um den Aspekt zum geforderten Zeitpunkt. Integritätsmerkmale sind Vollständigkeit, Konsistenz und Korrektheit. Vollständig bedeutet, dass alle für wichtig erachteten Informationen, also nicht nur Messelemente, sondern auch z.B. Korrekturgrößen vorhanden sind. Konsistenz beschreibt die Übereinstimmung mit dem Informationsmodell und die Korrektheit (Zuverlässigkeit im geodätischen Sinne) ist gewährleistet, wenn die Messungen oder die daraus abgeleiteten Größen keine groben Fehler oder systematische Messabweichungen enthalten.

Zu den Genauigkeitsmerkmalen zählen die metrische Genauigkeit (entspricht der Genauigkeit im geodätischen Sinne) und die semantische Genauigkeit, die bei diskreten Größen auftritt und den Abstraktionsgrad bei der Modellierung beschreibt. Ebenfalls wird in HEUNECKE ET AL. 2013 eine Hierarchie für die sieben genannten Qualitätsmerkmale angegeben, wobei Verfügbarkeit, Vollständigkeit und Konsistenz als primäre, Korrektheit und Aktualität als sekundäre und metrische und semantische Genauigkeit als tertiäre Qualitätsmerkmale gelten (vgl. Abbildung 7). Diese hierarchische Ordnung erleichtert und vereinfacht die Anwendung der Qualitätsmerkmale, da eine methodisch sinnvolle Reihenfolge vorgegeben ist (WILTSCHKO 2004). Bevor die sekundären bzw.

tertiären Qualitätskriterien betrachtet bzw. geprüft werden, ist zunächst zu kontrollieren, ob die primären erfüllt sind.



**Abbildung 7: Hierarchische Gliederung von Qualitätsmerkmalen (WILTSCHKO 2004)**

Während bei den primären und den sekundären Qualitätsmerkmalen auch eine innere Hierarchie besteht, treten die metrische und die semantische Genauigkeit in Abhängigkeit davon, ob die Informationen kontinuierlich oder diskret vorgehalten werden, stets getrennt auf.

Zusätzlich stellen die nicht im obigen Schema enthaltenen, aber bereits in Abschnitt 2.4 definierten Kriterien der Effektivität („die richtigen Dinge tun“) und der Effizienz („die Dinge richtig tun“) sowie die bereits erwähnte Sensitivität weitere Qualitätsmerkmale eines Monitoring-Systems dar.

Optimierung bedeutet einen Zustand oder einen Vorgang bezüglich eines oder mehrerer Gesichtspunkte wie zum Beispiel Qualität, Kosten, Geschwindigkeit, Effizienz oder Effektivität, manchmal auch zu Lasten eines anderen Aspektes, zu verbessern bzw. dem Optimum anzunähern (WEB 4). Es ist somit die Suche nach einer bestmöglichen Lösung unter gegebenen Voraus- und Zielsetzungen. Das Optimum ist folglich das beste zu erreichende Resultat im Sinne eines Kompromisses zwischen verschiedenen Parametern oder Eigenschaften. Im Gegensatz dazu steht das Ideal, womit das beste Denkbare bezeichnet wird (WEB 5).

### 3 Einflussgrößen bei GNSS Monitoring-Systemen

Bei GNSS Monitoring-Systemen gibt es von der Aussendung des Signals am Satelliten bis hin zur Aussage über eine Bewegung zahlreiche Einflussgrößen, die in Abbildung 8 zusammengestellt sind. Im Gegensatz zu den Einflussgrößen auf einen Prozess bzw. auf ein Objektverhalten (vgl. Abschnitt 2.1) sollen hier nur die Einflüsse auf das GNSS Monitoring-System betrachtet werden, die eine Auswirkung auf die Beobachtungsgleichungen (2.1) und (2.2), d.h. die Messung, sowie die Auswertung im Hinblick auf das Erkennen von Bewegungen haben.

<b>MESSUNG</b>	3.1. Satellitensegment
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Satellitenuhren</li> <li>• Bahndaten</li> </ul>
	3.2. Signalübertragungsweg
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ionosphäre</li> <li>• Troposphäre</li> <li>• Multipath</li> <li>• Beugung</li> </ul>
	3.3. Nutzersegment
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empfängeruhren</li> <li>• Cycle Slips</li> <li>• Mehrdeutigkeiten</li> <li>• Antennenparameter</li> </ul>
<b>AUSWERTUNG</b>	3.4. GNSS Auswertesoftware
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Funktionsumfang (funkt. und stoch. Modell)</li> </ul>
	3.5. Supplementäre Auswertung
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausgleichung</li> <li>• Filterung</li> <li>• Korrelationen</li> </ul>

Abbildung 8: Einflussgrößen auf dem Weg vom Satellit bis hin zur Aussage über eine Bewegung

Neben den Einflussgrößen auf die (Trägerphasen-)Messung, welche sich in die drei Kategorien Satellitensegment, Signalübertragungsweg und Nutzersegment einteilen lassen, existieren Einflussgrößen bei der Auswertung, da sich je nach Ansatz unterschiedliche Ergebnisse bei der Positionsbestimmung (absolute Positionierung) bzw. bei der Basislinienprozessierung (relative Positionierung) als auch bei einer optionalen supplementären Auswertung und somit letztendlich differierende Aussagen zum Bewegungsverhalten ergeben (vgl. Abbildung 8).

### 3.1 Satellitensegment

Auf ihrer Umlaufbahn werden die Satelliten u.a. vom Gravitations- und Magnetfeld der Erde, Anziehungskräften von Sonne und Mond sowie Sonnenwinden beeinflusst, so dass sie unregelmäßigen und nur bedingt vorhersagbaren Bahnen (Satellitenorbits) folgen. Diese Bahndaten müssen jedoch für eine exakte GNSS Positionsbestimmung bekannt sein. Orbitfehler  $O_a^i$  entstehen, wenn die tatsächliche Position des Satelliten nicht mit der vom Kontrollsegment berechneten und als Bestandteil der Navigationsnachricht vom Satelliten ausgesendeten entspricht. Mit den Broadcast Ephemeriden, die mit einer Genauigkeit von ca. 1 m (vgl. Tabelle 1) unmittelbar zur Verfügung stehen, ist eine Positionsbestimmung in Echtzeit möglich. Vom International GNSS Service (IGS) werden präzisere Bahndaten zum Download zur Verfügung gestellt, deren Verfügbarkeit und Genauigkeit variieren (vgl. Tabelle 1). Für eine Online Auswertung kommen davon aufgrund der Latenzzeit lediglich die Ultra-Rapid Orbits (predicted half) in Frage.

**Tabelle 1: Verfügbarkeiten und Genauigkeiten der IGS GNSS Ephemeriden (IGS 2015)**

GNSS Satelliten Ephemeriden		Genauigkeit		Latenz
		Orbits	Satellitenuhren	
Broadcast	GPS	~ 100 cm	5 ns RMS 2,5 ns SD	Echtzeit
Ultra-Rapid (predicted half)	GPS	~ 5 cm	3 ns RMS 1,5 ns SD	Echtzeit
Ultra-Rapid (observed half)	GPS	~ 3 cm	150 ps RMS 50 ps SD	3 – 9 Stunden
Rapid	GPS	~ 2,5 cm	75 ps RMS 25 ps SD	17 – 41 Stunden
Final	GPS	~ 2,5 cm	75 ps RMS 20 ps SD	12-18 Tage
	GLONASS	~ 3 cm	-	12-18 Tage

Während bei einer Absolutpositionierung der gesamte Bahnfehler in die Bestimmung der Position eingeht, ergibt sich nach BAUERSIMA 1983 bei einer Relativpositionierung für einen Orbitfehler  $dr$  (vgl.  $O_a^i$  in Formel 2.1 und 2.2) bei einer Basislinienlänge  $b$  der entfernungsabhängige Fehler  $db$  in Abhängigkeit des mittleren Abstandes zwischen Satellit und Empfänger  $r$  :

$$\frac{db}{b} = \frac{dr}{r} \quad (3.1)$$

Für eine Basislinie mit  $b = 10 \text{ km}$  bei einem mittleren Abstand von  $r = 20200 \text{ km}$  beträgt der Fehler  $db = 0,495 \text{ mm}$  bei Nutzung der Broadcast Ephemeriden ( $dr = 100 \text{ cm}$ ) bzw.  $0,025 \text{ mm}$  bei Verwendung der Ultra-Rapid Orbits (predicted half,  $dr = 5 \text{ cm}$ ). Der Orbitfehler ist demnach bei Relativpositionierungen für kurze Basislinien ( $< 10 \text{ km}$ ) im Allgemeinen vernachlässigbar, sollte jedoch bei höheren Genauigkeitsanforderungen sowie langen Basislinien berücksichtigt werden.

Eine vollkommene Synchronisation der Satellitenuhren ist trotz hochgenauer Atomuhren nicht möglich, weshalb die Beobachtungen neben den Orbitfehlern auch Satellitenuhrfehler  $dt^i$  (vgl. Formel 2.1 und 2.2) beinhalten. Diese können bei der relativen GNSS Positionierung durch die Bildung von Zweifachdifferenzen eliminiert oder durch Verwendung der IGS-Uhrkorrekturen (vgl. Tabelle 1) reduziert werden können.

### 3.2 Signalübertragungsweg

Auf dem Weg vom Satelliten zum Empfänger werden die elektromagnetischen Signale beim Durchqueren der Atmosphäre beeinflusst. Der Aufbau der Atmosphäre ist in Abbildung 9 mit den unterschiedlichen Klassifizierungsmöglichkeiten wie z.B. eine Gliederung nach der Temperatur (thermische Einteilung), nach der Zusammensetzung (chemische Einteilung) oder nach dem Grad der Ionisierung (elektrische Einteilung) dargestellt.

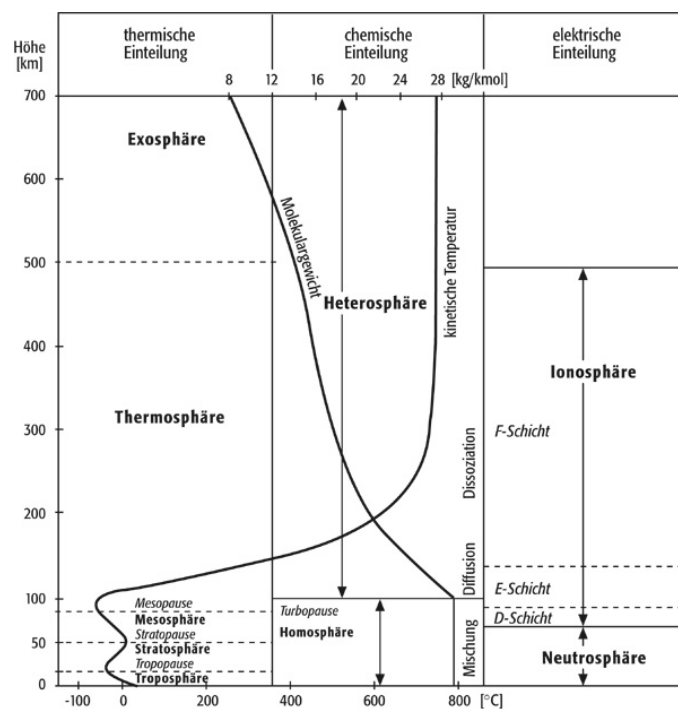


Abbildung 9: Aufbau der Atmosphäre (WEB 6)

Wird die Atmosphäre nach dem Grad der Ionisierung untergliedert, so existiert neben der Ionosphäre (elektrisch geladen) die Neutrosphäre (elektrisch neutral), welche sich aus Troposphäre (0 – 10 km), Tropopause und Stratosphäre (bis 50 km) zusammen setzt (vgl. Abbildung 9). Im Allgemeinen wird bei den atmosphärischen Einflüssen, die auf ein GNSS Signal während des Übertragungsweges vom Satelliten zum Empfänger wirken, jedoch nur zwischen Ionosphäre und Troposphäre unterschieden.



### 3.2.1 Ionosphäre

Die von einem GNSS Satelliten abgestrahlten elektromagnetischen Wellen durchqueren auf dem Weg zum Empfänger in einer Höhe von ca. 50 - 1000 km die Ionosphäre, welche bedingt durch die Ionisierung eine elektrische Leitfähigkeit besitzt. Die bei der Ionisation, hervorgerufen durch Ultraviolett- und Röntgenstrahlung der Sonne, frei werdenden Elektronen beeinflussen je nach Intensität die Laufzeit, die Richtung und die Polarisation der elektromagnetischen Wellen (vgl. WELLS ET AL. 1987 und ROBERTS 2002). Die stark höhenabhängige Dichte und Zusammensetzung der Luft, sowie die Tatsache, dass zur Ionisierung der verschiedenen Gase unterschiedliche Energien bzw. Wellenlängen benötigt werden, führt zu einem schichtförmigen Aufbau der Ionosphäre (Schicht D, E, F1 und F2). Die Strahlung wird somit je nach Wellenlänge in unterschiedlichen Höhen absorbiert und führt dort zur Ionisation (HEISE 2002).

Die Elektronenmenge und somit der Einfluss auf das Signal ist neben der Höhe bzw. der Schicht in der Ionosphäre abhängig von der geographischen Breite, der Sonnenaktivität, der Jahreszeit und der Tageszeit. Sie steigt ab Sonnenaufgang mit zunehmender Sonnenstrahlung an, erreicht mittags ein Maximum und klingt dann wieder ab. Die Menge an Elektronen  $N_T$  wird gemessen in der Einheit TEC (Total Electron Control), welche angibt, wie viele Elektronen sich auf dem Signalweg auf einem Quadratmeter befinden. Man unterscheidet dabei zwischen vertikalem (vertical TEC - VTEC) und geneigtem TEC (slant TEC - STEC) (PARKINSON UND SPILKER 1996).

Eine Elektronenflächendichte von  $10^{16}$  Elektronen pro  $m^2$  entspricht einer TEC Unit (TECU). Die Wechselwirkung der GNSS Signale mit den freien Elektronen verursacht eine Verzögerung der GNSS Code-Signale (Pseudorangemessungen) und eine Beschleunigung der Trägerphasenwellen (Phasenmessungen). Die Beträge sind gleich groß, aber die Vorzeichen unterschiedlich. Die daraus resultierenden Streckenänderungen (vgl.  $I_a^i$  in Formel 2.1 und 2.2) können nach WELLS ET AL. 1987 näherungsweise (unter Vernachlässigung höherer Ordnungen) mittels

$$d_{ion} = 40,28 \cdot \frac{N_T}{f^2} \quad (3.2)$$

berechnet werden.

Für die Frequenz  $L_1$  ergibt sich für 1 TECU somit ein Fehlerbereich (range error) von  $d_{ion} = 0,163 \text{ m}$  für die Pseudorangemessungen. Laut PARKINSON UND SPILKER 1996 repräsentieren TEC Werte von  $10^{16}$  bis  $10^{19}$  die Extremwerte der bisher beobachteten Werte. Die Ionosphärenfehler reichen nach ERICKSON 1995 und WELLS ET AL. 1987 von 50 m im Zenit (Elevation  $90^\circ$ ) bis zu 150 m am Horizont (Elevation  $0^\circ$ ).

Während bei absoluten Positionierungen die volle ionosphärische Verzögerung in das Fehlerbudget eingeht und somit ein Fehler von einigen Metern bei der Positionierung entstehen kann, wächst der

Einfluss der Ionosphäre nach ROTHACHER UND ZEBHAUSER 2000 bei der Bestimmung von Basislinienvektoren mit der Länge der Basislinie und ist somit entfernungsabhängig (vgl. WANNINGER 2000B). Im Falle, dass sie nicht berücksichtigt wird, ergibt sich eine scheinbare Verkürzung der Basislinie.

Es existieren zahlreiche, teils sehr komplexe Modelle, die versuchen, die tägliche Variation der Elektronenmenge zum monatlichen Mittelwert, die nach KLOBUCHAR 1987 bis zu 20-25 % beträgt, zu beschreiben (vgl. Tabelle 2).

**Tabelle 2: Ionosphären Modelle mit Effizienz und Kurzbeschreibung**

Modell/Ansatz	Effizienz	Kurzbeschreibung
Broadcast-Modell	50 %	Acht Koeffizienten, Übermittlung in Navigationsnachricht
State-of-the-Art Modell	75 %	Hunderte von Parametern, verfügbar via Internet
Satellite Based Augmentation Systeme (SBAS)	90 %	Korrekturen aus Realtime Beobachtungen, Verbreitung über geostationäre Satelliten
Mehrfrequenz-Messungen	99 %	Bildung ionosphärenfreier Linearkombinationen

Bei Zweifrequenz-Messungen kann, da die Ionosphäre ein dispersives Medium darstellt, d.h. der Brechungsindex frequenzabhängig ist, durch Bildung der ionosphärenfreien Linearkombination (mit Formel 3.3 bzw. 3.4) der Einfluss der Ionosphäre teilweise eliminiert und somit gemäß KLOBUCHAR UND KUNCHES 2001 eine Effektivität von 99 % (vgl. Tabelle 2) erreicht werden. Nach ROTHACHER UND ZEBHAUSER 2000 gilt

$$L_C = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} \cdot (f_1^2 \cdot L_1 - f_2^2 \cdot L_2) \quad (3.3)$$

$$L_C = 2,5457 \cdot L_1 - 1,5457 \cdot L_2 \quad (3.4)$$

Allerdings ist zu beachten, dass die Bildung der Linearkombination zu einer Verstärkung der Mehrwegeeffekte (vgl. Abschnitt 3.2.3) und einer Erhöhung des Messrauschens (vgl. Abschnitt 3.5.1) um das ca. Dreifache führt. Aus diesem Grund empfiehlt WANNINGER 2000A die Bildung der Linearkombination nur bei Basislinien, bei denen der Einfluss nicht durch Relativmessungen (z.B. Länge > 5 km) bereits weitgehend beseitigt werden kann.

Eine Möglichkeit, den Einfluss der Ionosphäre bei Einfrequenz-Messungen zu berücksichtigen, ist die Nutzung des Broadcast-Modells, welches auch Klobuchar-Modell oder auch ICA (Ionospheric Correction Algorithm) genannt wird. Dabei werden dem Benutzer in Abhängigkeit des Tages und der aktuellen Sonnenaktivität acht Koeffizienten, welche mindestens alle 10 Tage, bei Veränderung im solaren Strahlungsfluss auch häufiger, aktualisiert werden, mit der Satellitennachricht übermittelt. Nach KLOBUCHAR 1987 wurde die Limitierung auf acht Koeffizienten, mit denen 50 % der

ionosphärischen Laufzeitfehler korrigiert werden können, mit Rücksicht auf Rechenaufwand, verfügbare Nachrichtenlänge und der Begründung, dass mit mehr Parametern auch nur eine Steigerung auf 70-80 % Effektivität möglich wäre, gewählt. Für die Nacht wird eine konstante vertikale Laufzeitverzögerung von 5 ns (1,5 m) angenommen, wohingegen die Laufzeitverzögerung am Tag als Kosinusfunktion mit dem Maximum mittags beschrieben wird.

Das Klobuchar-Modell ist eine vereinfachte Version des empirischen Bent-Modells, welches Hunderte von Parametern verwendet und neben dem IRI (International Reference Ionosphere) Modell zu den State-of-the-art Modellen gehört, mit denen sich ca. 75 % der ionosphärischen Laufzeitfehler korrigieren lassen (KLOBUCHAR UND KUNCHES 2001). Für weitergehende Informationen zum Bent-Modell siehe BENT ET AL. 1972 und LLEWELLYN UND BENT 1973. Alternativ kann der Einfluss der Ionosphäre mit Hilfe von Satellite Based Augmentation Systemen (SBAS) wie dem Wide Area Augmentation System (WAAS) in den USA, dem European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) in Europa und dem Multi-functional Satellite Augmentation System (MSAS) in Asien berücksichtigt werden. Dazu wird die ionosphärische Verzögerung über Realtime Beobachtungen eines Referenznetzes bestimmt und die ermittelten Korrekturen unmittelbar von geostationären Kommunikationssatelliten im L-Band verbreitet (vgl. ANDERSSON 2008, ALLAIN UND MITCHELL 2008). Sofern ein Empfänger die Voraussetzung erfüllt, SBAS Signale empfangen zu können, ist nach KLOBUCHAR UND KUNCHES 2001 eine Effizienz von 90 % möglich (vgl. Tabelle 2).

### 3.2.2 Troposphäre

Die Troposphäre bildet den unteren Teil der Atmosphäre. Hier nimmt die Temperatur i.d.R. mit der Höhe ab (ca. 6,5°C/km). Die Mächtigkeit der Troposphäre variiert zwischen 8 km an den Polen und ca. 13 km am Äquator. Während in der Tropopause eine konstante Temperatur herrscht, steigt sie in der Stratosphäre an (vgl. Abbildung 9). Obwohl 25 % des Verzögerungseffektes oberhalb der Troposphäre, also in Tropopause und Stratosphäre hervorgerufen werden, spricht man insgesamt nur von troposphärischer Refraktion (PARKINSON UND SPILKER 1996).

Der troposphärische Einfluss auf die Signalausbreitung  $\Delta_{Trop}$  (vgl.  $T_a^i$  in Formel 2.1 und 2.2) wird bei HOFMANN-WELLENHOF ET AL. 2008 als Integral über die Brechzahl  $N$  entlang des Signalweges definiert und ist von der Elevation der Satelliten abhängig, da niedrige Elevationen einen längeren Weg des Signals durch die Troposphäre bedeuten (vgl. Formel 3.5).

$$\Delta_{Trop} = 10^{-6} \int N ds \quad (3.5)$$

Die Brechzahl  $N$  ergibt sich nach SMITH UND WEINTRAUB 1953 aus

$$N = (n-1) \cdot 10^6 = K_1 \frac{P_d}{T} + K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \quad (3.6)$$

mit  $P_d$  als Partialdruck in Millibar,  $T$  als Temperatur in Kelvin,  $e$  als Partialdruck des Wasserdampfes in Millibar und den Konstanten  $K_1$  bis  $K_3$ . Für die Konstanten werden in der Literatur verschiedene Werte angegeben (Zusammenstellung einiger vgl. ZEBHAUSER 2000) und nach SMITH UND WEINTRAUB 1953 gilt z.B.

$$K_1 = 77,6 \left[ \frac{K}{mb} \right], K_2 = 72 \left[ \frac{K}{mb} \right] \text{ und } K_3 = 3,75 \cdot 10^5 \left[ \frac{K^2}{mb} \right]$$

Unter Verwendung des Totaldruckes (Summe aller Partialdrücke)  $p = P_d + e$ , ergibt sich:

$$N = K_1 \frac{p}{T} + (K_2 - K_1) \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \quad (3.7)$$

Der erste Term bildet die trockene und die letzten beiden Terme die feuchte Komponente der troposphärischen Refraktion. Fasst man die Terme der feuchten Komponente zusammen und bildet eine neue Konstante  $K_4$  so erhält man

$$N = K_1 \frac{p}{T} + K_4 \frac{e}{T^2} \text{ bzw. } N = N_d + N_w \quad (3.8)$$

und somit mit den oben gegebenen Konstanten sowie für  $T = 273K$  (vgl. MENDES 1999):

$$N = 77,6 \frac{p}{T} + 3,73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \text{ bzw. } N = \frac{77,6}{T} \left( p + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (3.9)$$

Ungefähr 90 % der troposphärischen Refraktion werden durch den trockenen, die übrigen 10 % durch den feuchten Teil hervorgerufen. Der trockene Teil ist primär von der Temperatur und dem Luftdruck bestimmt (vgl. Formel 3.9) und somit leicht modellierbar. Sein Einfluss auf eine Pseudorange beträgt ca. 2,3 m in Zenitrichtung und ist mit einer Variation von 2 cm in 12 Stunden vergleichsweise konstant, wobei die Laufzeitverzögerung in niedrigen Elevationen bis auf ca. 25 m anwächst. Die feuchte Komponente ist dagegen primär vom Wasserdampfgehalt abhängig und aufgrund schneller zeitlicher und örtlicher Variationen schwer erfassbar. Ihr Einfluss beträgt in Zenitrichtung ca. 40 cm und variiert drei- bis viermal so stark wie der trockene Anteil (vgl. PARKINSON UND SPILKER 1996A, ROTHACHER UND ZEBHAUSER 2000, ZEBHAUSER 2000, HOWIND 2005).

$$\Delta_{Trop} = 10^{-6} \int N_d^{Trop} ds_0 + 10^{-6} \int N_w^{Trop} ds_0 \quad (3.10)$$

Zur Bestimmung der troposphärischen Refraktion können verschiedene Modelle (z.B. Hopfield, Saastamoinen etc.) verwendet werden, die im Allgemeinen auf der Vorstellung einer sphärisch

geschichteten Atmosphäre beruhen und einen Zusammenhang zwischen der troposphärischen Laufzeitverzögerung in unterschiedlichen Elevationen sowie den physikalischen Eigenschaften Temperatur, Luftdruck, Wasserdampfgehalt etc. herstellen (vgl. HOWIND 2005).

Solche Modelle treffen ausgehend von Werten für Luftdruck, Temperatur und relativer Feuchte auf Höhe der Position einer Antenne Annahmen über die atmosphärischen Bedingungen entlang des Signalweges oberhalb der Station (Extrapolation der am Boden gewonnenen Werte über den Signalweg), wobei die Werte an der Antenne entweder gemessen oder über Extrapolation der Referenzwerte auf Meereshöhe erhalten werden. Für die Standardatmosphäre gilt auf Meereshöhe

$$P_0 = 1013,25hPa, T_0 = 15^\circ C, RH_0 = 50\%$$

und zur Berechnung der meteorologischen Daten auf Stationshöhe werden vgl. HÄFELE 2011 i.d.R. verwendet:

$$\begin{aligned} P &= P_0 \left(1 - 0,0000226(h - h_0)\right)^{5,225} \\ T &= T_0 - 0,0065(h - h_0) \\ RH &= RH_0 \cdot \exp\left[-0,0006396(h - h_0)\right] \end{aligned} \quad (3.11)$$

HOPFIELD hat mit Hilfe von weltweiten Messungen empirisch eine Formel für den trockenen Anteil der Refraktion als Funktion der Höhe  $h$  über der Erdoberfläche gefunden (vgl. HOFMANN-WELLENHOF ET AL. 2008 und SEEBER 1988). Es gilt für  $h \leq h_d = 43\text{km}$

$$N_d(h) = N_{d0} \left(\frac{h_d - h}{h_d}\right)^4 \quad (3.12)$$

$$\text{mit } h_d = 40136 + 148,72 \cdot T_0 \text{ bzw. } h_d = 40136 + 148,72 \cdot (T - 273,16). \quad (3.13)$$

Für den feuchten Anteil wurde vgl. HOFMANN-WELLENHOF ET AL. 2008 und SEEBER 1988 aufgrund fehlender Erkenntnisse vereinfacht ein äquivalenter Ausdruck verwendet. Dabei gilt für  $h \leq h_w = 12 \text{ km}$

$$N_w(h) = N_{w0} \left(\frac{h_w - h}{h_w}\right)^4. \quad (3.14)$$

Nach Lösen des Integrals (siehe Formel 3.10) für den trockenen und den feuchten Anteil ergibt sich (Herleitung siehe PARKINSON UND SPILKER 1996)

$$\Delta_{Trop} = \frac{10^{-6}}{5} [N_d h_d + N_w h_w]. \quad (3.15)$$

Nach SAASTAMOINEN 1973 ergibt sich die Laufzeitverzögerung  $\Delta s_0$  aus:

$$\Delta s_0 = 0,002277 \text{ sec } z \left[ p + \left( \frac{1255}{T} + 0,05 \right) e^{-B \tan^2 z} \right] + \delta_R \quad (3.16)$$

mit dem Zenitwinkel  $z$  des Satelliten, dem atmosphärischen Druck  $p$  in Millibar, der Temperatur  $T$  in Kelvin, dem Wasserdampfdruck  $e$  in Millibar sowie den Korrekturwerte  $B$  und  $\delta_R$  (tabelliert und stationshöhenabhängig). Die beiden Korrekturwerte führten nach GÖRRES 1996 zu einem verbesserten Modell. Während der Korrekturterm  $B$  lediglich höhenabhängig ist, so ist  $\delta_R$  höhen- und zenitdistanzabhängig (vgl. HÄFELE 2011).

Da der erste Teil der Formel 3.16 abhängig von der Breite und der Stationshöhe ist, kann ein lokal korrigierter Wert durch Multiplikation mit  $(1+D)$  erreicht werden. Somit ergibt sich:

$$\Delta s_0 = 0,002277 \text{ sec } z(1+D) \left[ p + \left( \frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - B \tan^2 z \right] + \delta_R \quad (3.17)$$

mit  $D = 1 + 0,0026 \cos 2\phi + 0,00028h$  (vgl. SAASTAMOINEN 1973).

Alternativ können Mapping Funktionen, die eine Zenitkorrektur in Abhängigkeit der Elevation und der meteorologischen Einflüsse bestimmen, herangezogen werden (vgl. HOWIND 2005). Die einfachste und grundlegende Form für solche Mapping-Funktionen beschreibt die Funktion

$$\frac{1}{\cos(z)} = \frac{1}{\sin(e)} \quad (3.18)$$

in Anlehnung an das Modell Black und Eisner. Die troposphärische Laufzeitkorrektur ergibt sich als Produkt aus Korrektur in Zenitrichtung und dem mit Hilfe von Mapping Funktionen bestimmten elevationsabhängigen Faktor.

Der relative troposphärische Fehler zwischen den Endpunkten einer Basislinie wirkt sich auf den geschätzten ellipsoidischen Höhenunterschied in Abhängigkeit der maximal erreichten Zenitdistanz der Satelliten aus und wird abgeschätzt (vgl. BEUTLER 1987A, zitiert nach GÖRRES 1996) mit

$$\Delta H \approx \frac{\Delta_{Trop}(z=0^\circ)}{\cos z_{max}}. \quad (3.19)$$

Der Fehler verdreifacht sich bei einer Zenitdistanz von  $70^\circ$  gegenüber dem Betrag  $\Delta_{Trop}$  in Zenitrichtung und vergrößert sich für noch tiefer reichende Elevationsmasken. Für kurze Basislinien (bis 10 km) wird der troposphärische Effekt für beide Empfänger als gleich angenommen und ist daher bei einer Differenzbildung vernachlässigbar (vgl. ROBERTS 2002). Allerdings ist diese Annahme für Basislinien mit einem großen Höhenunterschied, wie es z.B. bei der Überwachung von Hängen oder Vulkanen der Fall ist, nicht realistisch. In diesem Fall empfiehlt sich eine Modellierung, da sonst Fehler von 2-5 mm pro 100 m Höhendifferenz entstehen können (vgl. GURTNER ET AL 1989, zitiert nach ROBERTS UND RIZOS 2001) und ein Fehler von 1 cm in der troposphärischen Verzögerung rund 3 cm in der Höhe bewirkt (vgl. ROTHACHER UND ZEBHAUSER 2000).

### 3.2.3 Stationsumfeld

Zusätzlich zur Ionosphäre und zur Troposphäre kann das Satellitensignal im Stationsumfeld durch z.B. Reflektion (Richtungsänderung), Brechung, Beugung (Signalstärkenänderung) und/oder Abschattung (Dämpfung) verfälscht werden.

Multipath, auch Mehrwegeausbreitung genannt, entsteht, wenn das Satellitensignal aufgrund von Reflektion nicht nur auf direktem Weg, sondern auch über mehrere Wege zur Antenne gelangt (siehe Abbildung 10). Das reflektierte Signal erreicht die Antenne bedingt durch die längere Signallaufzeit später als das direkte. Zusätzlich wird die Signalstärke abgeschwächt. Der Multipath ist frequenzabhängig und wirkt sich somit auf die Trägerphasen unterschiedlich aus. Der maximale Trägerphasenfehler beträgt  $\frac{1}{4} \lambda$  und somit je nach GNSS Signal ca. 4,7 cm bis 6,4 cm für die einzelnen Frequenzen (vgl. WILDT 2006).

Wird ein Signal wie in Abbildung 10 an einer horizontalen Reflektorebene bzw. unterhalb der Antenne reflektiert, spricht man von Vorwärtsreflektion (forward scatter geometry), im Falle einer vertikalen Reflektorebene von Rückwärtsreflektion (backscatter geometry). Wird das Signal sowohl an der horizontalen als auch an der vertikalen reflektiert, spricht man von kombinierter Reflektion (combined geometry) (HANNAH 2001, ROST 2011).

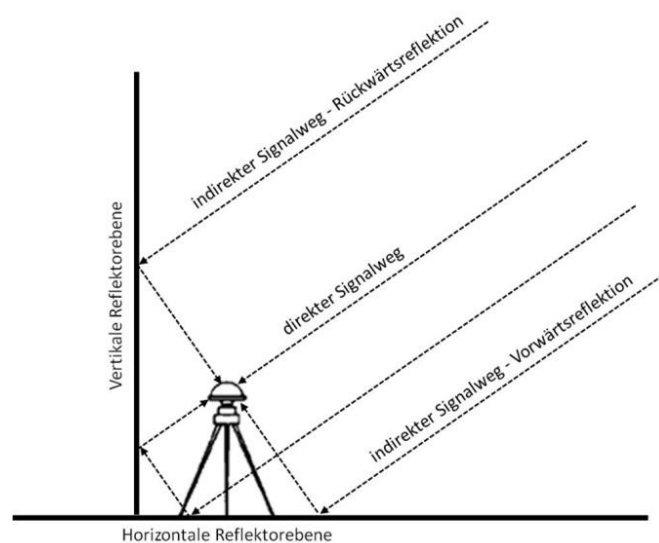
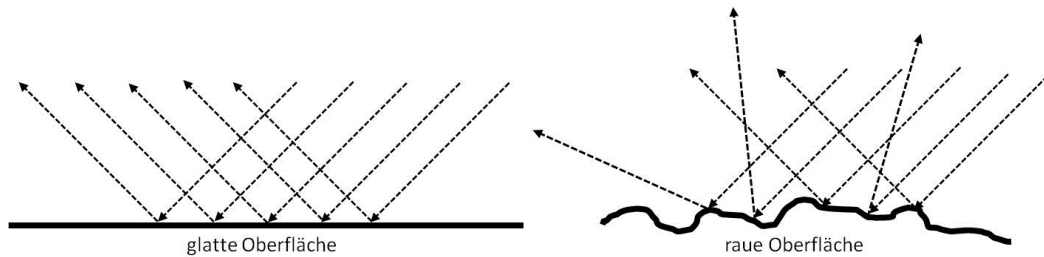


Abbildung 10: Reflektion an horizontaler und vertikaler Reflektorebene

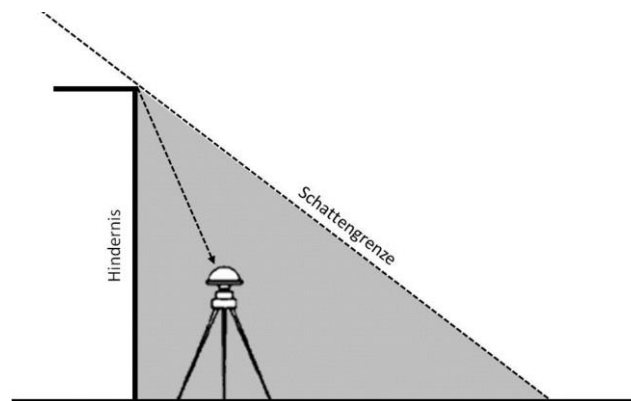
Da jedes Objekt im Strahlungskegel der Satelliten (Öffnungswinkel  $13,9^\circ$ ) als weitere Strahlungsquelle wirken kann, gibt es zu dem direkten Signal meist mehrere indirekte Signale. Unter Umständen können nur indirekte Signale empfangen werden (Beugung). Die Überlagerung (Interferenz) der indirekten Signale mit dem direkten Signal führt zu einem Mischsignal, welches Ursache für die Mehrwegeabweichung den Multipath ist.

Je nach Beschaffenheit der Oberfläche (glatt oder rau), an der das Signal reflektiert wird, ist zwischen gerichteter und diffuser Reflektion (specular and diffuse multipath) zu unterscheiden (vgl. Abbildung 11). Bei der diffusen Reflektion werden die parallel einfallenden Strahlen in verschiedene Richtungen reflektiert (gestreut). Diffuser Multipath ist nicht mit der Zeit korreliert und erzeugt ein Rauschen, wohingegen bei der gerichteten Reflektion systematische Messabweichungen entstehen, die eine Größenordnung von mehreren Metern für die Pseudorange und von mehreren Zentimetern für Phasenmessungen annehmen können (BRAASCH 1992, BILICH UND LARSON 2007, ROST 2011).



**Abbildung 11: Gerichtete (links) und diffuse (rechts) Reflektion**

Beugung (diffraction) tritt auf, wenn das Satellitensignal auf dem Weg vom Satelliten zur Antenne an einem Hindernis abgelenkt wird. Ein Empfang des direkten Signals ist nicht möglich, da sich die Antenne im geometrischen Schattenbereich des Hindernisses befindet (vgl. Abbildung 12); die Signalstärke wird abgeschwächt.



**Abbildung 12: Beugung an einem Hindernis**

Nach WILDT 2006 ist Beugung ein Sonderfall der Mehrwegeausbreitung, da das Satellitensignal auf dem Weg zur Antenne ebenfalls abgelenkt wird. Allerdings erreicht im Gegensatz zum Multipath stets nur das indirekte Signal die Antenne, da eine direkte Verbindung vom Satelliten zur Antenne nicht möglich ist. Beugung ist ebenso wie Multipath von der unmittelbaren Empfangsumgebung abhängig und tritt bei gleicher Satellitenposition und unveränderten Umgebungsbedingungen wiederholt auf. Eine Verminderung bzw. Eliminierung durch Differenzbildung ist nicht möglich,



aber mit einer Verlängerung der Beobachtungszeit (bei statischer Punktbestimmung) kann der Einfluss auf die Koordinatenbestimmung verringert werden. Darüber hinaus existieren wesentliche Unterschiede zwischen Beugung und Multipath, die zusammen mit den Gemeinsamkeiten in Tabelle 3 dargestellt sind.

**Tabelle 3: Unterschiede und Gemeinsamkeiten von Beugung und Multipath (WANNINGER ET AL. 2000)**

	Beugung	Multipath
Gemeinsamkeiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• abhängig von der unmittelbaren Empfangsumgebung</li> <li>• Wiederholung bei selber Satellitenposition und unveränderter Antennenumgebung</li> <li>• Reduzierung des Einflusses durch relative Positionsbestimmung nicht möglich</li> <li>• Verringerung des Einflusses auf die Koordinatenbestimmung bei statischer Punktbestimmung durch Verlängerung der Beobachtungszeit</li> <li>• verringerter Einfluss bei kinematischen Anwendungen infolge schneller Veränderung der Empfangsumgebung und Filtertechniken</li> </ul>	
Unterschiede	<ul style="list-style-type: none"> <li>• direktes Signal nicht empfangbar</li> <li>• frequenzunabhängig</li> <li>• maximaler Fehler im dm-Bereich</li> <li>• deutlich verringertes Signal-Rausch-Verhältnis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• direktes Signal i.d.R. empfangbar</li> <li>• frequenzabhängig</li> <li>• maximaler Fehler im cm-Bereich</li> <li>• fluktuierendes Signal-Rausch-Verhältnis</li> </ul>

Nach KAPLAN UND HEGARTY 2006 führen Abschattungen (shadowing) zu einer Dämpfung oder sogar zu einem Totalverlust des direkten Signals auf seinem Weg zur Antenne. Diese können im Freien oder im Inneren von Gebäuden u.a. durch Wände, Decken oder auch durch Bäume hervorgerufen werden. In diesem Fall kann das durch die Abschattung gedämpfte direkte Signal eine geringere Empfangsstärke aufweisen, als ein durch Beugung resultierendes indirektes oder reflektiertes Signal.

Möglichkeiten, die Einflüsse aus dem Stationsumfeld zu berücksichtigen, sind nach ROST 2011 insbesondere bei der Auswahl der Station bzgl. Örtlichkeit (Lage in Bezug auf mögliche Reflektoren oder Hindernisse) und der Hardware (Antennen- sowie Empfängertechnologie) sowie im Nachgang durch eine an die Bedingungen angepasste Weiterverarbeitung der Beobachtungsgrößen (z.B. durch Mittelbildung, Gewichtung, ...) gegeben (vgl. Abschnitt 5.1.4). Eine Reduktion des Multipath-einflusses durch Mittelbildung oder Langzeitfilterung bei Monitoring-Systemen bedeutet, dass die Echtzeitfähigkeit zunehmend verloren geht.

### 3.3 Nutzersegment

Neben den satellitenbezogenen Einflussgrößen und denen auf dem Signalübertragungsweg sind die Einflussgrößen des Nutzersegments (GNSS Empfänger und Antenne) wie z.B. Empfängeruhrfehler, Cycle Slips und Antennenparameter zu betrachten.

#### Empfängeruhrfehler

Der Empfängeruhrfehler  $dt_a$  (vgl. Formel 2.1 und 2.2) resultiert aus der Abweichung zwischen der Empfänger- und der Satellitenzeit. Im Gegensatz zu den GNSS Satelliten, die mit Atomuhren ausgestattet sind, verfügen die GNSS Empfänger über Quarzoszillatoren (vgl. ROTHACHER UND ZEBHAUSER 2000). Aus diesem Grund treten Abweichungen zwischen der Empfänger- und der Satellitenzeit auf. Bei der absoluten Positionsbestimmung werden die Empfängeruhrfehler mit den Koordinaten als Unbekannte mitbestimmt; bei der relativen Positionierung werden die Empfängeruhrfehler durch die Bildung von Doppeldifferenzen eliminiert (vgl. Abschnitt 2.3).

#### Cycle Slips

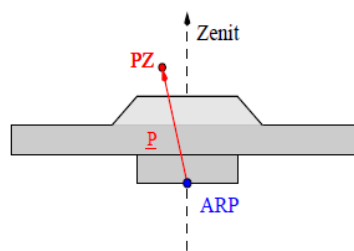
Die Phasenmehrdeutigkeit  $N_a^i$  (vgl. Formel 2.1 und 2.2) bleibt erhalten, so lange kein Cycle Slip auftritt. Bei einem Cycle Slip wird die Mehrdeutigkeit reinitialisiert, was einen Sprung in der momentanen akkumulierten Phase um eine ganzzahlige Anzahl von Zyklen verursacht (vgl. HOFMANN-WELLENHOF ET AL. 2008). Nach KAPLAN UND HEGARTY 2006 kann ein derartiger Signalverlust aufgrund eines untergehenden Satelliten, übermäßig schneller Bewegung der Antenne oder eingeschränkter Sicht in Richtung des Satelliten auftreten. Ferner geben HOFMANN-WELLENHOF ET AL. 2008 als weitere Ursachen schlechte SNR (Signal to Noise Ratio) Werte aufgrund ungünstiger Ionosphärenbedingungen (vgl. Abschnitt 3.2.1), Multipath (vgl. Abschnitt 3.2.3) und niedrigen Elevationen an.

Cycle Slips können zu einem Verlust einer Fixed Lösung führen und sollten daher erkannt und „eliminiert“ werden. Typische Ansätze sind das Ausschließen der ursächlichen Satelliten für eine vorgegebene Anzahl von Epochen unter der Annahme, dass das Signal dieser Satelliten schnell zur Normalität zurückkehren wird (vgl. KAPLAN UND HEGARTY 2006). In der Zwischenzeit wird die gefixte Basislinienlösung gehalten, sofern für mindestens vier Satelliten die Mehrdeutigkeiten bei der Cycle Slip-Erkennung gelöst werden - andernfalls kann allenfalls eine Float Lösung bereitgestellt werden.

#### Antennenparameter

Im Idealfall liegt der Schnittpunkt aller gemessener Phasen in einem Punkt der Antenne, dem Antennenphasenzentrum (PZ). In der Realität treten jedoch azimuth- und elevationsabhängige

Variationen auf, weshalb bei Kalibrierungen das mittlere Antennenphasenzentrum (Mittelpunkt eines ausgleichenden Kugelsegments aller empfangenden Richtungen) und seine richtungsabhängige Variation, die sogenannten Antennenphasenzentrumsvariationen (PCV – Phase Center Variations) bestimmt werden. Zusätzlich existiert an der Antenne ein mechanischer Referenzpunkt (ARP – Antenna Reference Point), auf den alle äußeren Zentrierelemente (Antennenhöhe) bezogen werden (vgl. Abbildung 13). Das Antennenoffset (PCO Phase Center Offset) gibt die Koordinaten des PZ im Bezug zum ARP an. Bei den Verfahren zur Kalibrierung unterscheidet man zwischen Feldverfahren (relativ und absolut) und Laborverfahren (absolut) (vgl. GÖRRES 2001, GÖRRES 2010).



**Abbildung 13: Geometrische Definition des Antennenphasenzentrums einer GNSS Antenne (GÖRRES 2001)**

Weitere Aspekte der Antennentechnologie (z.B. die Verwendung von Chokerringen und Grundplatten sowie Multiantennen) und der Empfängertechnologie bleiben im Rahmen dieser Arbeit unberücksichtigt. Einflüsse durch das Zubehör wie Bedienelemente, Stative, Lotstäbe, Zentriervorrichtung und Adapter sowie die Vermarkung werden hier ebenfalls nicht näher betrachtet.

### 3.4 GNSS Auswertesoftware

Die Prozessierung der erfassten Beobachtungen (Code- und Trägerphasenmessungen) hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der mit einem GNSS Monitoring-System zu erzielenden Ergebnisse. Verfügbare GNSS Auswertesoftwarepakete unterscheiden sich durchaus sehr stark in ihrem Funktionsumfang. Wissenschaftliche Softwarepakete stellen in der Regel eine wesentlich breitere Palette an Eingriffsmöglichkeiten in der Auswertung zur Verfügung, als für den Massenmarkt entwickelte „Blackbox“ Programme, die vom Anwender bei der Bedienung nicht unbedingt fundierte fachliche Kenntnisse voraussetzen.

Unter schwierigen Beobachtungsbedingungen bietet eine breite Funktionspalette mit unterschiedlichen Eingriffsmöglichkeiten, wie beispielsweise die Auswahl der Art der Positionslösung (absolut oder relativ, vgl. Abschnitt 2.3), welche Differenzenbildung (vgl. Abschnitt 2.3) zu Grunde gelegt ist, welche Korrekturmodelle für Ionos- und Troposphäre (vgl. Kapitel 3) angewendet werden

oder auf welchem stochastischen Modell die Gewichtung der Beobachtungen und die ausgegebenen Genauigkeiten basieren, jedoch die Möglichkeit ein optimiertes Ergebnis zu erhalten.

Neben den oben bereits exemplarisch genannten Kriterien spielen bei der Auswahl eines GNSS Prozessierungssoftwarepakets aber auch eine Vielzahl weiterer Kriterien eine entscheidende Rolle im Hinblick darauf, ob sich ein Programm für die jeweilige Anwendung eignet oder nicht. Einen Überblick über maßgebliche Entscheidungskriterien pro oder kontra einer Prozessierungssoftware zeigt folgende Auflistung:

- Allgemeine Systemvoraussetzungen:
  - Systemvoraussetzungen (unterstützte Hardware, Betriebssystem)
  - Lizenzierung (Offlinelizenzierung z.B. mittels Hard- oder Softwarekey, Online-lizenzierung, lizenzfrei)
  - Unterstützte (Roh-)Datenformate (u.a. automatische Erkennung und Konvertierung der Datenformate)
  - Unterstützte Schnittstellen zur Sensoransteuerung bzw. externen Dateneinbindung (Seriell, Universal Serial Bus (USB), Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP), Network Transport of Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) via Internet Protocol (NTRIP), File Transfer Protocol (FTP))
  - Benutzerfreundlichkeit und Bedienbarkeit: Graphische Benutzeroberfläche (GUI), Batchbetrieb über automatisierten Kommandozeilenaufwurf (Command-Line Interface CLI), Dynamik Link Library (DLL), Software Development Kit (SDK)
  
- Prozessierungsoptionen:
  - Relative oder absolute Positionierung
  - Postprocessing- oder Realtime-Auswertung
  - Statische oder kinematische Prozessierung
  - Code- und/oder Trägerphasen-Auswertung
  - Unterstützte Satellitensysteme: GPS, GLONASS, Galileo, QZSS, BeiDou und SBAS
  - Kombination von Satellitensystemen bei der Auswertung z.B. GPS+GLONASS, GPS+Galileo, GLONASS+Galileo
  - Unterstützte Frequenzen:  $L_1$ ,  $L_1 + L_2$ ,  $L_1 + L_2 + L_5$
  - Möglichkeit zur Vorwärts- bzw./und/oder Rückwärtsprozessierung

- Stellgrößen wie Cut-Off-Elevation zum Ausschluss von Satelliten, Basislinienlängenbegrenzung
- Unterstützte Korrekturmodelle:
  - Ionosphären- und Troposphären-Korrektur
  - Berücksichtigung von Antennenphasenzentrumskorrekturen, Unterstützung von Individualkalibrierungen
  - Earth Orientation und Earth Tides Korrekturen
  - Nutzung von (präzisen) Ephemeriden bzw. Orbits (Broadcast, Ultrarapid, Rapid, Precise)
- Ergebnisausgabe und Bewertungskriterien:
  - Ausgabeformate: vollständige Ergebnisse als einfach weiter zu verarbeitende Text- oder XML-Datei
  - Freie Auswahl der Ausgabeinformationen bzw. freie Gestaltung der Ausgabedatei
  - Möglichkeit Zwischenergebnisse einzelner Rechenschritte einsehen zu können
  - Automatisierte bzw. gestaltbare Qualitäts- und Integritätskontrolle
  - Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse

Welches oder welche der Auswahlkriterien letztendlich maßgeblich sind, hängt von der Anwendung ab. Für das in Kapitel 4 vorgestellte Low-Cost GNSS Monitoring-System ist beispielsweise die CLI-Funktionalität eine essentielle Voraussetzung - neben der Tatsache, dass eine möglichst breite Palette an Prozessierungsoptionen und wählbaren Korrekturmodellen zu bevorzugen ist.

## 3.5 Supplementäre Auswertung

### 3.5.1 Mittelwert und Tiefpassfilterung

In der Geodäsie ist das Messergebnis  $\hat{x}$  ein aus Beobachtungen gewonnener Schätzwert für den wahren Wert  $\tilde{X}$  einer Größe  $X$  (z.B. 3D Vektor  $\hat{x}$  bzw. die daraus abgeleitete Position). Aufgrund des Zufallscharakters von Messergebnissen wird i.d.R. die Beobachtung der Größe  $X$  mehrfach durchgeführt. Die Messwerte werden als Realisierung  $x$  der Zufallsvariablen bezeichnet, wobei bei Ingenieurvermessungen die Begriffe Messwert  $x$  und Beobachtung(-swert)  $l$  synonym verwendet werden (siehe DIN 18710-1 2010). Diese Messwerte beinhalten zufällige sowie systematische

Abweichungen, können durch grobe Fehler verfälscht werden, variieren im Bereich der statistisch definierten Wahrscheinlichkeitsverteilung und ergeben eine Beobachtungsreihe bzw. eine Stichprobe  $l_1, l_2, \dots, l_n$  oder  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Diese wird im Anschluss einer lokalen Verarbeitung unterzogen, bei der ein repräsentativer Wert für die gesamte Stichprobe bestimmt wird. Hierfür werden grobe Fehler durch eine Ausreißereliminierung (z.B. nach der  $3\sigma$ -Regel) entfernt und systematische Messabweichungen z.B. durch das Anbringen von Korrekturen berücksichtigt. Übrig bleibt das sogenannte Messrauschen durch zufällige Messabweichungen sowie unbekannte bzw. nicht erfassbare systematische Messabweichungen. Ist die interessierende Größe dabei unveränderlich und stellt somit allein eine Funktion des Ortes dar, kann eine Aggregation der Beobachtungsreihe durch einfache Mittelwertbildung erfolgen, wobei es verschiedene Arten von Mittelwerten (z.B. arithmetisches Mittel, Median, Modus, ...) gibt.

Der arithmetische Mittelwert  $\bar{x}$ , auch L2 Norm Schätzer genannt, ist das gebräuchlichste Maß und wird mit Hilfe der Beobachtungen  $l_i$  berechnet:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \quad (3.20)$$

Er setzt voraus, dass nur zufällige Abweichungen in den Beobachtungen vorliegen und ist daher im Gegensatz zum Median nicht robust gegen Ausreißer. Aus diesem Grund muss vorab eine entsprechende Ausreißereliminierung durchgeführt werden. Der Median  $x_m$ , auch L1 Norm Schätzer genannt, ergibt sich bei nach der Größe sortierten Beobachtungen  $l_g$  als

$$\begin{aligned} x_m &= l_{(n+1)/2}^g \text{ wenn } n \text{ ungerade} \\ x_m &= \frac{1}{2} \left( l_{n/2}^g + l_{(n+2)/2}^g \right) \text{ bei } n \text{ gerade.} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Im einfachsten Fall geht man von gleich genauen Beobachtungen aus, aber auch eine unterschiedliche Gewichtung, z.B. nach Qualität oder aber auch nach Aktualität der Beobachtungen ist möglich (vgl. Abschnitt 3.5.2). Für weitere Informationen sei z.B. auf VOß 2004 und NIEMEIER 2001 verwiesen.

Variiert die beobachtete Größe, ist sie eine Funktion des Ortes und der Zeit, wodurch die Berücksichtigung des Zeitfaktors unerlässlich wird; es ist der Übergang auf einen Prozess  $X(t)$  erforderlich. Die Realisierung eines sogenannten stochastischen Prozesses (mathematische Beschreibung eines zeitlich geordneten, zufälligen Vorganges) enthält neben der interessierenden Erscheinung auch zufallsbedingte Abweichungen. Der gleitende Mittelwert  $\bar{x}_j$  wird verwendet, um solche Zeitreihen geglättet darzustellen (Tiefpassfilterung). Dabei werden die einzelnen originären

Messwerte durch Mittelwerte ersetzt, welche aus dem originären Messwert und seinen  $w-1$  benachbarten Messwerten gebildet werden (vgl. KOHN ET AL. 2011).

$$\bar{x}_j = \frac{1}{w} \sum_{i=j}^{w+j-1} x_i \cdot g_i \quad (3.22)$$

Je größer der Wert  $w$  ist, desto stärker wird je nach Gewichtung der einzelnen Messwerte der Verlauf der Zeitreihe geglättet. Es ist zu beachten, dass die Berechnung der gleitenden Mittel gegenüber der originären Zeitreihe zu einer Zeitverzögerung führt. Der Tiefpassfilter kann zusätzlich zu seiner Filterlänge  $w$  auch über die Filterform (Gewichtung  $g_i$ ) gestaltet werden.

Bei GNSS Monitoring-Systemen, die auf PDGNSS beruhen, bilden die 3D Basislinienvektoren (Epochenergebnisse) komponentenweise jeweils eine Zeit- bzw. Messreihe und stellen die Realisierung des Prozesses (Deformationsprozess) zu diskreten Zeitpunkten dar. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Messwerten bzw. hier Epochenergebnissen ist die Abtastrate (Epochendauer), die bei Monitoringaufgaben zwischen einigen Minuten und Stunden beträgt und i.d.R. konstant ist. Gegenüber einer ursprünglichen Planung ist die Abtastrate ggf. anzupassen, wenn sich der Prozess anders darstellt als zunächst unterstellt.

Die Genauigkeit einer Zeitreihe (im geodätischen Sinn, vgl. Abschnitt 2.5) lässt sich mit Hilfe der Standardabweichung  $s_0$  angeben, welche als positive Wurzel der Varianz  $s_0^2$  definiert ist. Die Varianz eines Messwertes einer Zeitreihe lässt sich beim Vorliegen des wahren Wertes  $\tilde{X}$  mit den wahren Abweichungen  $\varepsilon_i$  und bei Vorliegen des arithmetischen Mittelwertes mit Hilfe der Verbesserungen  $v_i$  wie folgt bestimmen (vgl. NIEMEIER 2001):

$$s_0^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad (3.23)$$

$$s_0^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2 \quad (3.24)$$

Sie ist ein Maß für die Streuung (Abweichung vom Erwartungswert), wobei zwischen der empirischen Varianz  $s_0^2$  einer Messung und der theoretischen Varianz  $\sigma_0^2$ , die sich bei  $n \rightarrow \infty$  ergibt, unterschieden wird.

Zu beachten ist, dass sich bei größerer Filterlänge geringere Standardabweichungen ergeben, aber die Echtzeitfähigkeit eines Monitoring-Systems zunehmend verloren geht. In Form einer Kombination verschiedener Filterlängen lässt sich ein geeigneter Kompromiss zwischen Genauigkeit und Aktualität finden. Ein kurzes Filter (z.B. Stundenmittel) für zeitnahe Aussagen kann beim Vorliegen weiterer Werte, beispielsweise mit einem Tagesmittel, verifiziert oder revidiert werden.

### 3.5.2 Vermittelnde Ausgleichung

Die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit (im geodätischen Sinne, vgl. Abschnitt 2.5) bei Low-Cost GNSS Monitoring-Systemen kann gesteigert werden, wenn nach der Basislinienprozessierung im Falle einer überbestimmten Konfiguration die einzelnen Basislinien in eine geodätische Netzausgleichung eingehen.

Das funktionale Modell beschreibt bei einer vermittelnden Ausgleichung den Zusammenhang zwischen dem Beobachtungsvektor  $\mathbf{l}$  und dem Ergebnisvektor  $\hat{\mathbf{x}}$ . Die Gültigkeit dieser funktionalen Beziehungen ist im Anschluss durch statistische Methoden zu prüfen. Mit dem Verbesserungsvektor  $\mathbf{v}$  und der Koeffizientenmatrix  $\mathbf{A}$ , in der die partiellen Ableitungen der Beobachtungsgleichungen nach den Unbekannten stehen, ergibt sich:

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}} \quad (3.25)$$

Zur Gewichtung der einzelnen Beobachtungen wird ein stochastisches Modell eingeführt. Dafür ist es erforderlich, dass für die Beobachtungen (z.B. 3D Basislinienvektoren) möglichst zuverlässige Genauigkeitsangaben in Form von Standardabweichungen vorliegen, da die gesuchten Parameter (in diesem Fall die 3D Positionen der Objektpunkte) sowie deren Genauigkeiten davon abhängig sind. Die Kovarianzmatrix  $\Sigma_{ll}$  enthält die Varianzen der Einzelbeobachtungen auf der Hauptdiagonalen und die Informationen über Kovarianzen/Korrelationen zwischen verschiedenen Beobachtungen auf den Nebendiagonalen. Hierbei ist der Korrelationskoeffizient  $\rho_{ij}$  ein Maß für die stochastische Abhängigkeit zwischen den Beobachtungen.

$$\Sigma_{ll} = \begin{matrix} (n, n) & = & \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \dots & \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n \\ \rho_{21}\sigma_2\sigma_1 & \sigma_2^2 & \dots & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1}\sigma_n\sigma_1 & \rho_{n2}\sigma_n\sigma_2 & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3.26)$$

Im Falle unkorrelierter Beobachtungen enthält die Gewichtsmatrix  $\mathbf{P}$  lediglich auf der Hauptdiagonalen die Gewichte der Einzelbeobachtungen, die sich aus den Standardabweichungen der Einzelbeobachtungen  $\sigma_i$  und der Varianz der Gewichtseinheit  $\sigma_0^2$  ergeben.

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_l^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_0^2/\sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_0^2/\sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_0^2/\sigma_n^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & & 0 \\ & p_{22} & \\ 0 & & \ddots \\ & & & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Basislinien mit großen Höhenunterschieden oder extremen Basislinienlängen können somit mit einer anderen (niedrigeren) Gewichtung eingehen bzw. berücksichtigt werden, als Basislinien mit geringen Höhenunterschieden und Längen.



Als Ergebnis der vermittelnden Ausgleichung erhält man

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \quad (3.28)$$

$$\mathbf{Q}_{xx} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \quad (3.29)$$

$$\mathbf{Q}_{vv} = \mathbf{Q}_{ll} - \mathbf{A} \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{A}^T \quad (3.30)$$

wobei  $\mathbf{Q}_{xx}$  die Genauigkeitsmaße von  $\hat{\mathbf{x}}$  und  $\mathbf{Q}_{vv}$  die Kofaktorenmatrix der Verbesserungen sind. Ein Maß für die Kontrolliertheit liefert die Redundanzmatrix  $\mathbf{R}$  (Formel 3.31), auf deren Hauptdiagonalen die Redundanzanteile  $r_i$  für jede Beobachtung stehen. Diese zeigen, wie gut die jeweilige Beobachtung durch die Übrigen kontrolliert ist und werden auch als  $EV_i$ -Wert (Einfluss auf die Verbesserung, Formel 3.32) angegeben. Um Ausreißer erkennen zu können, sind hohe Redundanzanteile erforderlich.

$$\mathbf{R} = \mathbf{Q}_{vv} \mathbf{P} \quad (3.31)$$

$$EV_i = r_i \cdot 100\% \quad (3.32)$$

Ein Ausreißer liegt vor, wenn die Normierte Verbesserung größer ist als der Grenzwert.

$$NV_i = \frac{v_i}{\sigma_0 \sqrt{(q_{vv})_{ii}}} \quad (3.33)$$

Die Größe eines etwaigen groben Fehlers wird angegeben mit:

$$GF_i = \nabla l_i = \frac{-v_i}{r_i} \quad (3.34)$$

### 3.5.3 Korrelationsfunktionen

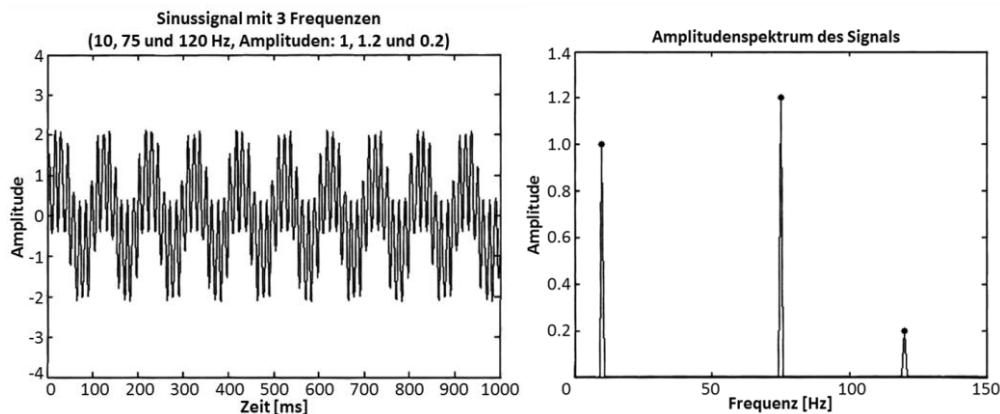
Zur Erkennung von Zusammenhängen zwischen einzelnen Zeitpunkten (z.B. im Hinblick auf Periodizitäten) kann die Autokovarianzfunktion  $C_{xx}(t, \tau)$  bzw. in normierter Form die Autokorrelationsfunktion  $R_{xx}(t, \tau)$  verwendet werden. Voraussetzung ist, zuvor einen eventuell vorhandenen Trend zu eliminieren und eventuell existierende Datenlücken zu schließen. (vgl. NEUNER UND FOPPE 2009)

$$\begin{aligned} C_{xx}(t, \tau) &= E \left\{ \left[ X(t) - \mu_x(t) \right] \cdot \left[ X(t+\tau) - \mu_x(t+\tau) \right] \right\} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \left\{ \left[ x_j(t) - \mu_x(t) \right] \cdot \left[ x_j(t+\tau) - \mu_x(t+\tau) \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.35)$$

$$R_{xx}(t, \tau) = \frac{C_{xx}(t, \tau)}{\sigma_x(t) \sigma_x(t+\tau)} \quad (3.36)$$

Für stationäre Prozesse verbleibt nur die Abhängigkeit von  $\tau$ . Zusätzlich kann (vgl. MUFFERT ET AL. 2009) eine Überführung in den Frequenzraum mittels Fouriertransformation hilfreich sein, da im Ortsbereich mitunter periodische Effekte unentdeckt bleiben und bei überlagerten Schwingungen die

einzelnen Frequenzen und ihre Amplituden nicht durch eine reine visuelle Betrachtung detektiert werden können (vgl. Abbildung 14 links). Anhand des Amplitudenspektrums sind die Frequenzen mit den entsprechenden Amplituden ablesbar (vgl. Abbildung 14 rechts).



**Abbildung 14: Sinussignal mit drei Frequenzen im Orts- (links) und im Frequenzbereich (rechts) (MUFFERT ET AL. 2009)**

Mit Hilfe der Fast-Fourier-Transformation kann eine Messreihe direkt in den Frequenzraum transformiert werden, ohne zuvor die Autokovarianzfunktion zu bestimmen. Dabei ist die Abtastrate  $\Delta t$  entsprechend der Nyquist-Frequenz (vgl. Formel 3.37) entscheidend, damit Schwingungen eindeutig erkannt werden können. Zudem ist auf eine ausreichend lange Beobachtungsdauer zu achten.

$$v_N = \frac{1}{2\Delta t} [\text{Hz}] \quad (3.37)$$

Zur Validierung von Ergebnissen können diese im Zusammenhang mit anderen Messwerten (z.B. der Temperatur) betrachtet werden. Somit können z.B. gemessene Bewegungen mit den aus Temperaturänderung und Ausdehnungskoeffizient des Materials berechneten verglichen werden.

Die Ähnlichkeit zwischen den Zufallsvariablen unterschiedlicher Prozesse lässt sich mit Hilfe der Kreuzkovarianz- und Kreuzkorrelationsfunktion

$$C_{xy}(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \cdot \sum_{i=-N}^N \{ [x(i) - \mu_x] \cdot [y(i+\tau) - \mu_y] \} \quad (3.38)$$

$$R_{xy}(\tau) = \frac{C_{xy}(\tau)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3.39)$$

bestimmen. Auch hier ist wie bei der Autokovarianz- bzw. der Autokorrelationsfunktion ein eventuell vorhandener Trend vorab zu eliminieren und existierende Datenlücken sind z.B. durch Interpolation zu schließen.

## 4 GeoSN – Beispiel eines Low-Cost GNSS Monitoring-Systems

### 4.1 Grundsätzlicher Aufbau und Funktionsweise

Das Layout des GeoSN, wie es über Jahre im Institut für Geodäsie der UniBwM entwickelt wurde (siehe hierzu vor allem PINK 2007), sieht an dem zu überwachenden Objekt der Anforderung entsprechend viele und im umgebenden Stabilbereich mindestens einen Sensorknoten mit einem GNSS Empfänger und einer angeschlossenen GNSS Antenne vor (vgl. Abbildung 15). Dabei ist es zunächst nicht erforderlich, die GNSS Empfänger und Antennen entsprechend zu spezifizieren. Neben Low-Cost Empfängern können auch High-End Empfänger genutzt werden, was zu einem hybriden Netzaufbau führt.

Mittels einer PDGNSS Auswertung (vgl. Abschnitt 2.3) können über Basislinien zwischen den im Stabilbereich und den im Objektraum befindlichen, in Form von Sensorknoten verbauten GNSS Empfängern, deren Positionen in Near Realtime bestimmt werden. Hierzu werden die Rohdaten aller Empfänger standardmäßig mit einer Datenrate von 1 Hz „on the fly“ per Wireless Local Area Network (WLAN) oder via drahtgebundener Datenübertragung an eine Zentralstation gesendet, an der die Prozessierung der Basislinien erfolgt. Das Ergebnis der Basislinienauswertung sind 3D Positionen aller Objektpunkte für die ausgewertete Epoche. Die Epochenlänge ist frei wählbar, ein Intervall von 15 Minuten hat sich als sehr geeignet herausgestellt, um eine zuverlässige Ermittlung einer Basislinie zu gewährleisten. Vorteil dieses Vorgehens ist, dass die 3D Positionen in jeder Epoche jeweils neu berechnet werden und somit als stochastisch unabhängig gelten können.

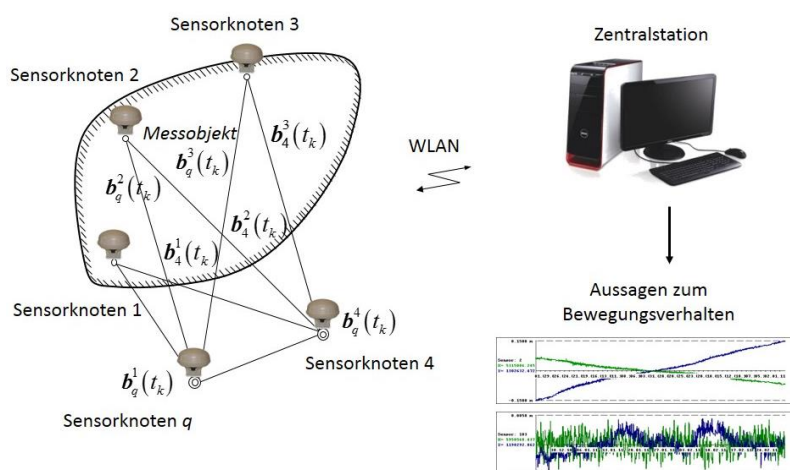


Abbildung 15: Layout des GeoSN (GLABSCH ET AL. 2011A)

Den Kern des Monitoring-Systems bildet die Central Control Application (CCA, vgl. Abbildung 17), die mit der graphischen Programmiersprache Labview (National Instruments) umgesetzt ist und die Steuerung der einzelnen Arbeitsschritte eines Monitoring-Systems (vgl. Abbildung 3) übernimmt. Ein Remote-Zugriff z.B. via Internet eröffnet die Möglichkeit zur Fernwartung und zum Datentransfer. Durch die Verwendung standardisierter Formate ist eine Anbindung an offene Geodateninfrastrukturen gegeben.

#### 4.1.1 Darstellung der Hardwarekomponenten

Die Bestandteile eines autarken Low-Cost GNSS Sensorknotens, dessen schematischer Aufbau in Abbildung 16 gezeigt ist, sind die Sensor- (GNSS Empfänger und Antenne), die Kommunikations- und die Stromversorgungskomponente.

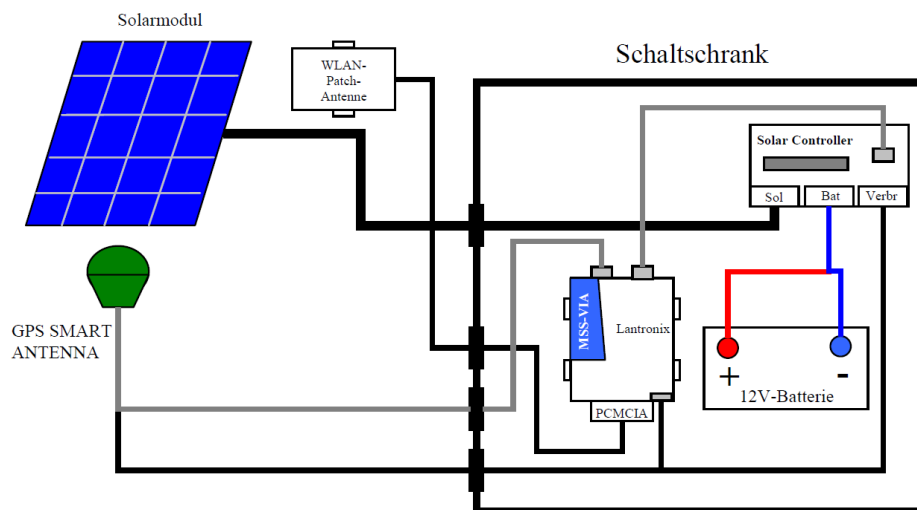


Abbildung 16: Schematischer Aufbau eines autarken Low-Cost GNSS Sensorknotens (PINK 2007)

Entsprechend dem Low-Cost Gedanken kommt als GNSS Sensorik eine Kombination aus Einfrequenz-Empfänger und Antenne zum Einsatz; prinzipiell ist auch die Verwendung von Mehrfrequenz-Empfängern und entsprechenden Antennen möglich. Wichtigstes Auswahlkriterium der Empfänger ist die Fähigkeit des Trägerphasentrackings sowie deren Ausgabe über eine Schnittstelle. Für die Projekteinsätze des GeoSN fiel die Wahl zunächst auf sogenannte Enclosures, bei denen der Empfänger und die Antenne in einer gekapselten Bauweise vereint sind. Die Tabelle 4 zeigt einige Spezifikationen der verwendeten Enclosures. Die ursprünglich von der Firma Canadian Marconi Company (CMC, mittlerweile NovAtel) entwickelte Smart Antenna Super-star II (SSII) ist nicht mehr am Markt verfügbar und wurde durch das Nachfolgemodell Smart Antenna V1G

(NovAtel) ersetzt. Weitere GNSS Empfänger der Firma NovAtel sowie der Firma u-blox wurden bereits in das System GeoSN integriert und getestet (vgl. Abschnitt 5.2.3).





**Tabelle 4: Spezifikationen der für Projekteinsätze verwendeten Enclosures (NOVATEL 2004, NOVATEL 2006B)**

	Integrierter Empfängertyp	Anzahl Kanäle	Genauigkeit Trägerphase	Schnittstellen
NovAtel Smart Antenna SSII	Superstar II	12 L <sub>1</sub> GPS	1 cm rms	RS-232 / RS-422
NovAtel Smart Antenna V1G	OEMV-1G	14 L <sub>1</sub> GPS 12 L <sub>1</sub> GLONASS	0,15 cm rms	RS-232 / RS-422 / USB

Die Kommunikation zwischen den einzelnen Sensorknoten und der Zentralstation, auch über größere Distanzen hinweg, erfolgt mittels WLAN als Hauptübertragungstechnik mit einer Datenübertragungsrate von bis zu 54 Mbit/s (IEEE 802.11g). In dem als Infrastrukturnetz ausgebildeten Design besteht die Kommunikationskomponente der Sensorknoten i.d.R. aus einem Schnittstellenkonverter, welcher u.a. die vom GNSS Empfänger an der seriellen Schnittstelle (RS 232 oder RS 485) ausgegebenen Daten in Ethernet Signale umwandelt. Dieser Wireless Device Server (z.B. WiBox von Lantronix, vgl. Tabelle 5) verfügt zusätzlich über ein integriertes Funkmodul, mit dem die Einspeisung der konvertierten Daten ins WLAN ermöglicht wird.

An der Zentralstation wird als Infrastrukturelement ein Access Point (z.B. Netgear WG602) benötigt, der die gesamte netzinterne Kommunikation steuert und die über das WLAN übermittelten Datenpakete an den Auswerterechner weiterleitet. Integriert in einem Sensorknoten, kann dieser Daten von anderen Sensorknoten weiterleiten. Ein Sensorknoten wird durch diese Repeaterfunktionalität aufgewertet und besitzt damit einen höheren Stellenwert im Infrastrukturnetz. Zur Überbrückung von Reichweiten ab ca. 100 m empfiehlt es sich, externe WLAN Antennen mit größerem Antennengewinn (z.B. Cisco AIR-ANT 3338 oder 2506) unter Berücksichtigung der gesetzlich erlaubten Höchstabstrahlleistung zu verwenden (100 mW EIRP - Equivalent Isotropic Radiation Power - in Deutschland und Österreich, vgl. CARDEI ET AL. 2005). Die genannten Kommunikationskomponenten sind mit ihren technischen Spezifikationen und Kenngrößen in der Tabelle 5 zusammengefasst.

**Tabelle 5: Ausgewählte WLAN Kommunikationskomponenten (LANTRONIX 2006, NETGEAR 2004, CISCO 2003, CISCO 2006)**

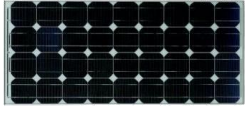



Wireless Device Server: Lantronix WBX2100E	Access Point: Netgear WG602	WLAN Antennen:	
		Cisco AIR-ANT 3338	Cisco AIR-ANT 2506
			
Umgebungstemperatur: -40 °C bis +70 °C	Umgebungstemperatur: 0 °C bis +60 °C	Umgebungstemperatur: -30 °C bis +70 °C	Umgebungstemperatur: 0 °C * bis +20 °C
Übertragungsstandard: 802.11b/g Max. Übertragungsrate: 54Mbps	Übertragungsstandard: 802.11b/g Max. Übertragungsrate: 54Mbps	Abstrahlcharakteristik: Direktional (12,4°H, 12,4°V)	Abstrahlcharakteristik: Omnidirektional (360° H, 38°V)
Verschlüsselung: WPA, WEP, TKIP	Verschlüsselung: WPA2, WPA, WEP	Antennengewinn: 21dBi	Antennengewinn: 5,2dBi
Serial Schnittstelle: 1xRS232, 1xRS232/485/422	Schnittstelle: 10/100 Mbit/s RJ45	Reichweite: ~7,2 km bei 54 Mbit/s ~32,3 km bei 11 Mbit/s	Reichweite: ~0,3 km bei 54 Mbit/s ~2,7 km bei 11 Mbit/s
Antenne abnehmbar, Anschluss: RP-SMA	Antenne abnehmbar, Anschluss: RP-SMA	Anschluss: RP-TNC	Anschluss: RP-TNC

\* Die Funktionalität wurde auch bei Temperaturen von bis zu -30°C in den Projekten nachgewiesen.

Die Stromversorgung der Sensorknoten kann auf einen autarken Betrieb (vgl. Abbildung 16) ausgelegt sein und umfasst eine sinnvoll dimensionierte Pufferbatterie, einen Laderegler für das Energie-/Batteriemanagement und einen i.d.R. auf regenerativer Basis beruhenden Energielieferanten (Solarpanel, Windgenerator) oder beispielsweise eine Brennstoffzelle. Steht ein 230 V Netzanschluss zur Verfügung, empfiehlt es sich neben dem auf die Verbraucherspannung ausgelegten Spannungswandler einen zusätzlichen Pufferspeicher vorzusehen, um Stromausfälle oder Netzschwankungen überbrücken zu können.

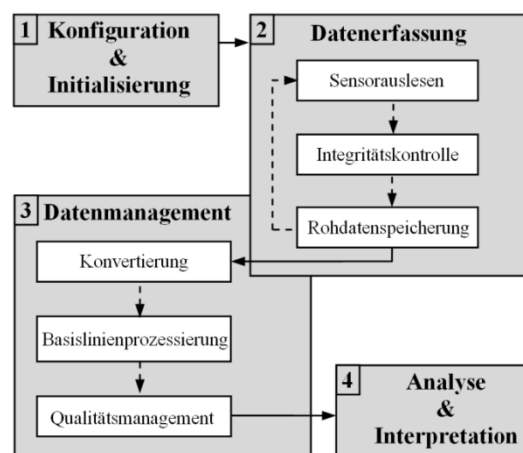
Aufgrund der Recheneinheit fällt an der Zentralstation ein höherer Energieverbrauch an, weshalb für diese nach Möglichkeit ein 230 V Netzanschluss vorzusehen ist. Ein autarker Betrieb ist jedoch nicht ausgeschlossen. Ausgewählte Stromversorgungskomponenten für einen autarken Betrieb eines Sensorknotens, deren Funktionalität in den bisherigen Projekten (vgl. Abschnitt 4.4) nachgewiesen wurde, sind in der Tabelle 6 zusammengestellt.

**Tabelle 6: Stromversorgungskomponenten für einen autarken Betrieb (SUNSET 2007, STECA 2009, SONNENSCHN 2008, SFC 2010)**

Solarpanel: Sunset AS 80	Laderegler: Stecca Solarix 2401	Solarbatterie: Sonnschein dryfit solar 60 Ah	Brennstoffzelle: SFC EFOY 600
			
Nennspannung: 17,3 V	Nennspannung: 12 V	Nennspannung: 12 V	Nennspannung: 12 V
Nennleistung: 80 Wp	Max. Laststrom: 10 A	Nennkapazität (C 100): 60 Ah	Nennleistung: 25 W
Nennstrom: 4,6 A	Tiefentladeschutz: min. 11,1 V	Entladestrom (I 100): 0,6 A	Ladestrom: 2,1 A Max. 600 Wh/Tag
Kurzschlussstrom: 4,95 A	Schnittstelle: RJ 45	Zyklen nach IEC 896 T2: 400	Methanolverbrauch: 1,1 l/KWh
Größe (L x B x H): 1200 x 483 x 35 mm	Größe (L x B x H): 188 x 128 x 49 mm	Größe (L x B x H): 261 x 135 x 230 mm	Größe (L x B x H): 435 x 200 x 276 mm
Gewicht: 8,2 kg	Gewicht: 0,55 kg	Gewicht: 19 kg	Gewicht: 6,3 kg

#### 4.1.2 Beschreibung der Systemsoftware

Der Datenfluss des Monitoring-Systems wird über die modular strukturierte Central Control Application gesteuert. Sie basiert auf der graphischen Programmiersprache LabView, National Instruments, und erlaubt das Einbinden externer Softwarepakete, insofern diese kommandozeilenbasiert aufgerufen werden können.



**Abbildung 17: Aufbau und Ablauf der Central Control Application (CCA) (GLABSCH ET AL. 2010B)**

Die in der Abbildung 17 dargestellten Arbeitsschritte des sequentiellen Programmablaufs bilden im Wesentlichen die Prozesskette eines Monitoring-Systems ab (vgl. Abschnitt 2.2).

Zum Systemstart erfolgt einmalig der Arbeitsschritt Konfiguration & Initialisierung, der bei Bedarf im laufenden Betrieb jederzeit wiederholt durchgeführt werden kann und damit die Neuinitialisierung des Systems ermöglicht. Die in einer Konfigurationsdatei enthaltenen Informationen zum Systemlayout, wie Anzahl und Typ der Sensoren, Art und Parameter der Datenkommunikation (IP-Adressen, Ports und Datenraten), Speicherpfade, Epochenlänge sowie Verweise zur Steuerung externer Softwarepakete, werden geladen und die Sensoren entsprechend diesen Vorgaben konfiguriert und initialisiert. Änderungen im Systemlayout lassen sich durch Anpassung der Konfigurationsdatei jederzeit auf benutzerfreundliche Art und Weise vornehmen, da weitere Eingriffe in den Programmcode nicht nötig sind.

Nach erfolgreicher Initialisierung startet die Datenerfassung. Die binären Rohdaten (Trägerphasenmessungen, Ephemeriden und weitere relevante Informationen wie SNR, Elevation...) der GNSS Sensoren werden in einer Permanentenschleife sukzessive abgerufen, auf Integrität geprüft und für jeden Empfänger kontinuierlich in einer separaten Rohdatendatei (je nach Empfängertyp, z.B. log-Datei) epochenweise gespeichert. Am Ende jeder Epoche werden diese Rohdatendateien „abgeschlossen“ und stehen somit dem parallel laufenden Prozess der Datenverarbeitung zur Verfügung, ohne dass Konflikte mit Zugriffsrechten auftreten.

Der Schritt Datenmanagement beinhaltet eine Konvertierung der binären Rohdatendateien in das für die Basislinienprozessierung vorausgesetzte Datenformat sowie die sich unmittelbar anschließende Auswertung mit dem Basislinienprozessor. Vor Freigabe der Ergebnisse, werden diese einer ersten Qualitätskontrolle (z.B. Float oder Fixed Lösung, Genauigkeitskriterien) unterzogen. Hierbei werden die Float Lösungen standardmäßig verworfen, aber auch weitere Auswahlkriterien sind denkbar. Zu beachten ist, dass durch ein Eliminieren von Epochenlösungen eine Lücke in den Zeitreihen entsteht. Die Ergebnisse stehen anschließend in Form von Epochenlösungen zur Analyse & Interpretation (incl. Visualisierung und zzgl. etwaiger Alarmierung) zur Verfügung. Anhand der Epochenpositionen, eventuell in Verbindung mit einem gleitenden Mittelwert über einen frei definierbaren Zeitraum (vgl. Abschnitt 3.5.1), können somit Aussagen über das aktuelle Bewegungsverhalten eines Punktes abgeleitet werden. Sämtliche Zeitreihen können graphisch dargestellt werden und stehen abgespeichert für Folgeauswertungen zur Verfügung.

Für die GNSS Auswertung sowie für den Arbeitsschritt Analyse & Visualisierung wird aktuell auf externe Softwarepakete zurückgegriffen. Ursprünglich wurde als Basislinienprozessor das Produkt GrafNav der Firma Waypoint inklusive dem dazugehörigen Konverter (Wconvert) in den Prozessablauf integriert. Für die Zeitreihenanalyse und zur graphischen Darstellung kam das an der Fachhochschule Karlsruhe (Prof. Jäger) entwickelte Softwarepaket GOCA zum Einsatz. Prinzipiell lässt sich jedoch auch jedes alternativ am Markt verfügbare Programm einbinden, sofern dieses in



den automatischen Datenfluss integrierbar ist, die benötigten Schnittstellen definiert sind und umgesetzt werden können.

Im Zuge der Weiterentwicklung wurden alternative Programme u.a. zur Basislinienberechnung, wie z.B. Wa1 (WASOFT 2010A) und RTKLIB (TAKASU 2010A) integriert; auf deren Untersuchung wird in Abschnitt 5.2.4 näher eingegangen. Außerdem erfolgte eine Abkehr von rein filebasierter Speicherung hin zur Nutzung einer MySQL-Datenbank (SQL – Structured Query Language).

Die Implementierung aller integrierten Programme in der CCA ist mit den Ein- und Ausgangsformaten in der Abbildung 18 veranschaulicht. Jeweils ausgehend von den binären Rohdaten (in z.B. log- oder ubx-Dateien) erfolgt eine Konvertierung mit RTKCONV oder Wconvert, in das von dem für die Prozessierung benutzten Softwarepaket benötigte Format (z.B. RINEX - Receiver Independent Exchange Format). Die Ergebnisse der Prozessierung werden in Abhängigkeit des Basislinienprozessors im ASCII-Format (American Standard Code for Information Interchange) in sol-, txt- oder pos-Dateien gespeichert. Relevante Inhalte dieser Dateien werden in dem von dem für die Analyse verwendeten Softwarepaket benötigten Format (z.B. gka-Datei) und in einer Datenbank (vgl. Abschnitt 4.3) dokumentiert.

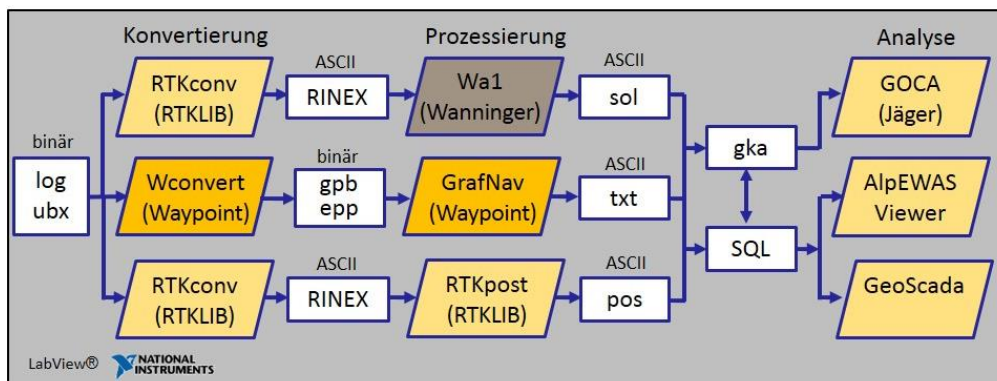


Abbildung 18: Implementierung externer Programme in der Central Control Application

## 4.2 Ansteuerung der GNSS Empfänger

Die Grundvoraussetzung, damit GNSS Empfänger für derartig konzeptionierte Monitoring-Systeme verwendet werden können, ist die Möglichkeit der Rohdatenausgabe der Trägerphasenmessungen über eine Schnittstelle. Während einige Hersteller dies direkt vorsehen, unterdrücken andere diese Option bewusst bzw. geben deren Dokumentation nicht bekannt. Mit einer im Internet frei

verfügbaren Software ist es beispielsweise möglich, die Rohdaten bei einigen Garmin Modellen zu entschlüsseln (siehe WEB 7, CEDERHOLM 2010).

Zu den benötigten Rohdaten für eine Basislinienauswertung zählen u.a. die Ephemeriden (Bahndaten der Satelliten), die neben den Trägerphasenmessungen unabdingbar sind für die Positionsbestimmung der Empfänger. Sie werden lediglich an einem Empfänger einer Basislinie benötigt, da nur identische Satelliten zur Auswertung herangezogen werden. In manchen Fällen ist eine Näherungsposition des Rovers erforderlich, die z.B. über die SPP Positionsbestimmung (vgl. Abschnitt 2.3) erhalten werden kann. Für die Basislinienauswertung können zusätzliche Informationen (SNR etc.) notwendig sein (vgl. Abschnitt 5.1.4). Die Zeitabstände, in denen die verschiedenen Daten erforderlich sind, variieren. Während die Rohdaten üblicherweise mit einer Datenrate von z.B. 1 Hz aufgezeichnet werden, benötigt man die Ephemeriden nur einmal pro Epoche bzw. nur, wenn andere Satelliten einbezogen werden. Im Fokus der nachfolgenden Ausführung steht die Nutzung von Low-Cost GNSS Empfängern.

#### 4.2.1 Nachteile proprietärer Software

In der Regel können die GNSS Empfänger mit proprietärer Software (vgl. Tabelle 7) (an-)gesteuert werden. Mit diesen Programmen ist die Konfiguration der Empfänger, die Datenaufzeichnung bzw. -speicherung im gewünschten Intervall und die Visualisierung von GNSS Daten problemlos möglich. Diese Konfigurationen lassen sich abspeichern und wieder aufrufen, wodurch für mehrere Empfänger schnell die gleichen Einstellungen verwendet werden können.

**Tabelle 7: Proprietäre Software der verwendeten Low-Cost GNSS Empfänger (Auswahl)**

GNSS Empfänger	Proprietäre Software
NovAtel Smart Antenna SSII	Starview
NovAtel Smart Antenna V1G	NovAtel CDU
u-blox Lea 4T/6T	u-Center

Solche Software erweist sich als ungeeignet, wenn sie für die Steuerung eines GNSS Empfängers einen direkten Anschluss am Steuerungsrechner über eine serielle Schnittstelle (RS232) oder einen USB-Port zwingend benötigt. Die maximal mögliche Kabellänge zur seriellen Datenübertragung begrenzt die Entfernung zwischen dem Steuerungsrechner und dem Empfänger, so dass im ungünstigsten Fall an jedem einzelnen GNSS Empfänger ein PC/Auslesecontroller notwendig wäre. Dies ist nicht zweckmäßig, da sich die Hardware- und Installationskosten unnötig erhöhen.

Einige Firmen bieten die Möglichkeit der Steuerung über TCP/IP, sodass mit Hilfe eines Schnittstellenkonverters (seriell zu Ethernet) längere Strecken zum GNSS Empfänger entweder per Netzkabel oder per WLAN überbrückt werden können. In diesem Zusammenhang ist auch eine Verwendung eines Wireless GSM (Global System for Mobile Communications) Routers mit integriertem GPS Empfänger z.B. von Cabtronix (vgl. ZHANG ET AL. 2012) denkbar. Ist die Steuerung über TCP/IP von der Software nicht vorgesehen, kann i.d.R. mit Hilfe eines virtuellen, simulierten seriellen Port (z.B. Lantronix Comport Redirector, vgl. WEB 8) eine Kommunikation ermöglicht werden.

Ferner ist es ein Vorteil, wenn die Empfänger automatisiert gesteuert werden können (Konfiguration und Datenaufzeichnung), um z.B. im laufenden Betrieb je nach Situation bestimmte Einstellungen anpassen oder einen Empfänger nach einer langen Unterbrechungsphase neu initialisieren zu können. Die herstellerspezifische Software ermöglicht meist nur einen Empfänger je geöffnetem Programmfenster zu steuern. Somit müssten für die Aufzeichnung mehrerer Empfänger, Programmsequenzen parallel laufen, was zu einer hohen Recherauslastung führen kann.

Aus oben genannten Gründen wurde eine eigene Software für die Steuerung der GNSS Empfänger entwickelt. Die Befehle für die Ansteuerung (Dokumentation der Steuerung) der Low-Cost GNSS Empfänger werden nicht immer von den Hardwareherstellern in Handbüchern freigegeben. Eine Möglichkeit zum Ermitteln der Befehle besteht darin, die Schnittstelle über einen Serial Port Monitor „abzuhören“ (z.B. HHD Serial Port Monitor). Dieser ermöglicht es, den Datenverkehr zwischen einer Anwendung (z.B. Starview) und dem seriellen Gerät mitzulesen.

#### **4.2.2 Datenformate der Empfänger**

Im Regelfall werden binäre Rohdaten von den Low-Cost GNSS Empfängern über die integrierte Schnittstelle ausgegeben. Die Rohdaten gilt es zu speichern und zu interpretieren. Generell empfiehlt sich aufgrund des Datenvolumens eine Kommunikation und Speicherung von binären Daten. Die einfachste Dateiart ist eine Textdatei, in der jedes Zeichen sich selbst repräsentiert, in der also keine binären SteuerCodes vorkommen (KERSKEN 2011). Bei Binärdateien handelt es sich um Dateien mit numerischen Inhalten, wobei ohne Kenntnis der Spezifikation des jeweiligen Dateiformats nicht erkennbar ist, ob die gespeicherten Zahlen an bestimmten Stellen für Befehle oder für Nutzdaten stehen. Dabei ist zu beachten, dass für die Speicherung und Darstellung von Binärdaten unterschiedliche Wortbreiten, wie z.B. 8, 16, 32 oder 64 Bit, und unterschiedliche Reihenfolgen Anwendung finden.

Eine einzelne Binärstelle, die ein Rechner speichert, wird als Bit (Abkürzung für binary digit) bezeichnet, welches nur den Wert 0 oder 1 annehmen kann. Durch Zusammenfassung von 8 Bits entsteht 1 Byte, wobei den einzelnen Bits jeweils in Abhängigkeit ihrer Position/Stelle im Byte eine Zahl ( $2^0, 2^1, \dots, 2^7$ ) zugewiesen wird. Durch Addition der einzelnen Zahlenwerte (Produkte aus Zahl und Bit) können somit mit einem Byte 256 Zustände/Zahlen (0-255) wiedergegeben werden. Dabei wird das Bit mit dem Wert  $2^7$  (bzw.  $2^{n-1}$ ) als das höchstwertigste Bit (most significant bit – msb) und das Bit mit dem Wert  $2^0$  als das niedrigstwertige Bit (least significant bit – lsb) bezeichnet. Bei der Interpretation eines Bytes ist die Bit-Reihenfolge zu beachten, die die Reihenfolge, in der die Bits eines Datenwortes identifiziert werden, beschreibt (rechts nach links (lsb 0) oder von links nach rechts (msb0)). Somit ergibt sich vgl. Tabelle 8 für das Byte 10101010 je nach Bit-Reihenfolge die Zahl 85 (msb0) oder 170 (lsb0).

**Tabelle 8: Interpretation eines Bytes in verschiedenen Bit-Reihenfolgen**

Byte	1	0	1	0	1	0	1	0	
msb0	$2^0$	$2^1$	$2^2$	$2^3$	$2^4$	$2^5$	$2^6$	$2^7$	
	1	0	4	0	16	0	64	0	85
lsb0	$2^7$	$2^6$	$2^5$	$2^4$	$2^3$	$2^2$	$2^1$	$2^0$	
	128	0	32	0	8	0	2	0	170

Neben dem Binärsystem existiert das Hexadezimalsystem, welches sich auf die Grundzahl 16 bezieht, d.h. alle Zahlen werden nur mit 16 verschiedenen Ziffern (1-9 und A-F) dargestellt. Für ein Byte ergeben sich die in der Tabelle 9 dargestellten Hexadezimalwerte für die Zahlen 0-255. Für Hexadezimalzahlen gibt es die Schreibweisen:  $76_{16}$ ,  $76_{\text{hex}}$ ,  $76_{\text{h}}$ ,  $76_{\text{H}}$  oder  $0x76$ .

**Tabelle 9: Hexadezimalsystem – Grundzahl 16 (1 Byte)**

Hexadezimal									„Zahl“
00	01	02	...	09	0A	0B	...	0F	0-15
10	11	12	...	19	1A	1B	...	1F	16-31
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
90	91	92	...	99	9A	9B	...	9F	144-159
A0	A1	A2	...	A9	AA	AB	...	AF	160-175
B0	B1	B2	...	B9	BA	BB	...	BF	176-191
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
F0	F1	F2	...	F9	FA	FB	...	FF	240-255

Sollen größere Zahlen durch Bytes dargestellt werden, so müssen dafür mehrere Bytes unter Berücksichtigung der Byte-Reihenfolge verwendet werden (z.B. zwei Bytes für die Zahlen 0 - 65535). Diese beschreibt die Reihenfolge, in der die Bytes gelesen werden. Es ist zwischen Big Endian und Little Endian zu differenzieren. Während beim Big Endian das hochwertigste Byte (Most significant Byte – MSB), also das Byte mit dem höchstwertigen Bit, vorn also an kleinster Speicheradresse und das niederwertigste Byte (Least – LSB) hinten gespeichert wird, so ist es beim Little Endian genau umgekehrt. Die zwei Bytes 0x12 und 0x34 ergeben somit 0x1234 bzw. 0x3412.

### **4.2.3 Kommunikation im Sensornetz mit den Empfängern**

Bei der Kommunikation mit GNSS Empfängern sind verschiedene Spezifikationen zu beachten. Neben der bereits erwähnten Bit- und Byte-Reihenfolgen spielt u.a. auch die Wortbreite, sprich der Datentyp (char, unsigned char, short, unsigned short, long, double) eine entscheidende Rolle. Dieser gibt an, aus wie vielen Bits der Zahlenwert der gewünschten Information (z.B. GPS Sekunde) besteht.

#### Format der Nachrichten

Je nach Empfänger gibt es unterschiedliche Nachrichtenformate. Während das Binärformat aufgrund der geringeren Datenmenge geeigneter zur Datenübertragung ist, so ist ASCII zur Kommunikation aufgrund der Lesbarkeit vorteilhafter. Die NovAtel Smart Antenna V1G kann, im Gegensatz zur u-blox Lea 4T/6T und zur NovAtel Smart Antenna SSII, neben binären Anfragen auch ASCII Anfragen verarbeiten, anhand derer auch das gewünschte Ausgabeformat (binär, ASCII oder abbreviated ASCII) definiert wird. Die ASCII Anfrage bzgl. der Rohdatenausgabe würde für die drei möglichen Ausgabeformate wie folgt aussehen:

- log rawephem (Abbreviated ASCII)
- log rawephema (ASCII)
- log rawephemb (Binär)

#### Aufbau der Nachrichten

Der Aufbau der gesendeten und empfangenden Nachrichten unterscheidet sich je nach den im Monitoring-System integrierten Empfängern. Generell bestehen die Nachrichten aus einem Header (bei u-blox nicht als solcher titulierte), der eigentlichen Nachricht und einer Checksumme. Im Allgemeinen beinhalten die Header als Kennzeichnung für eine neue Nachricht sogenannte Syncbytes bzw. Startwerte (AA4412, 01, B562), die jeweilige Nachrichten-ID und die Länge der Nachricht (ohne Header, ohne Checksumme). Bei der NovAtel Smart Antenna V1G sind noch

weitere Informationen (z.B. GPS Zeit) enthalten, womit sich die Headerlänge entsprechend vergrößert (vgl. Anhang A 1 und Tabelle 10).

**Tabelle 10: Aufbau der Nachrichten incl. Byte-Anzahl (NOVATEL 2005, NOVATEL 2007, U-BLOX 2010B)**

	Header	Nachricht	Checksumme
NovAtel Smart Antenna SSII	4	x	2
NovAtel Smart Antenna V1G	28	x	4
u-blox Lea 4T/6T	6	x	2

Die Checksummenberechnung ist eine einfache Maßnahme zur Gewährleistung der Datenintegrität bei der Datenübertragung oder -speicherung. Sie ist unerlässlich, da Fehler in der Datenübertragung zu einer Fehlinterpretation führen. In einfachen Fällen wird die Checksumme, z.B. als Quersumme aller Bytes eines bestimmten Bereiches (z.B. Nachricht ohne Header) oder als Summe der mit einem bestimmten Faktor multiplizierten Bytes berechnet und mit der übertragenden Checksumme verglichen. Zahlendreher würden bei diesen beiden Varianten nicht erkannt werden. Die zyklische Redundanzprüfung (cyclic redundancy check – CRC) ist eine kompliziertere Checksummenberechnung, welche auf Polynomdivision beruht. Letztere kommt bei der NovAtel Smart Antenna V1G zum Einsatz.

#### Nachrichten-Name und -ID

Der Name bzw. die ID der notwendigen Nachrichten wird benötigt, um dem GNSS Empfänger mitteilen zu können, welche Daten er zu schicken hat. Während es bei den NovAtel Smart Antennas SSII nur IDs gibt, haben die Nachrichten bei der NovAtel Smart Antenna V1G und bei den u-blox Lea6T neben den IDs auch Namen, aus denen der Inhalt ableitbar ist (z.B. rawephemb für die Ephemeriden). In Tabelle 11 sind die benötigten Nachrichten mit den verschiedenen IDs exemplarischer Empfänger dargestellt. Für ausführlichere Informationen siehe Anhang A 2 bis A 4.

**Tabelle 11: Message ID ausgewählter Empfänger (NOVATEL 2005, NOVATEL 2007, U-BLOX 2010B)**

		NovAtel Smart Antenna SSII	OEM V	u-blox Lea 4T/6T
Position		ID 20	ID 42	ID 0102
Ephemeriden	GPS	ID 22	ID 41	ID 0231
	GLONASS	-	ID 723	-
Rohdaten		ID 23	ID 43	ID 0210
Zeit		ID 21	Header	ID 0210
Azimut, Elevation		ID 33	ID 48	ID 0130
Glocklock		-	ID 719	-

### Nachrichtenintervall

In der Regel können Nachrichten einmalig, in bestimmten Intervallen oder nur bei Änderungen ausgegeben werden. Die Form der Auswahl variiert von Empfängertyp zu Empfängertyp. Bei den NovAtel Smart Antennas SSII z.B. ist dies mit in der ID festgelegt. Diese besteht aus 8 Bits, wobei für die eigentliche ID nur 7 Bits benötigt werden und das 8. Bit definiert, ob die Ausgabe einmalig (Bit ist 0) oder kontinuierlich (Bit ist 1) erfolgt. Eine wirkliche Datenrate kann hier nur bei bestimmten Nachrichten (z.B. Rohdaten) vorgegeben werden. Bei den NovAtel Smart Antennas V1G erfolgt die Auswahl der Wiederholungsform durch den Zusatz once, ontime xx (Zeitabstand zwischen den Wiederholungen in Sekunden) oder unchanged.

### Interpretation der Nachrichten

Genauso wie das korrekte Anfordern ist auch das richtige Interpretieren der Nachrichten von großer Bedeutung. Hierfür müssen ebenfalls die Reihenfolge und die Wortlänge bekannt sein. Es muss klar sein, an welcher Position in der Nachricht, welche Information in welchem Format steht. Anhand der IDs werden die Nachrichten entsprechend ihren Typs in den einzelnen Dateien (z.B. log-Datei mit Rohdaten) gespeichert. Diese können dann entweder direkt von der Auswertedatei gelesen oder müssen zuvor noch konvertiert werden. Ferner werden aus den Nachrichten benötigte Informationen wie SNR, Azimut, Elevation etc. entnommen. Für detaillierte Informationen siehe Anhang A 1 bis A 4.

## **4.3 Datenhaltung**

Essentiell für ein funktionierendes Monitoring-System ist eine strukturierte und sichere Datenhaltung. Diese muss gewährleisten, dass die Datenmengen persistent vorgehalten werden, eine schnelle Verarbeitung der Daten zu jeder Zeit erfolgen kann, die Daten vor Fremdzugriffen geschützt sind und ein kontrollierter paralleler Mehrnutzerbetrieb problemlos möglich ist. Es wird dabei zwischen Datei- und Datenbanksystemen unterschieden.

### Dateisystem

Ein Dateisystem stellt einen Abstraktionsmechanismus dar, um die Daten auf einem Speichermedium in geeigneter Form zugänglich zu machen, ohne dass sich die Benutzer mit den Details der Datenablage befassen müssen (RECHENBERG UND POMBERGER 2006). Es hat folgende Nachteile (KEMPER UND EICKLER 2011):

- Redundanz und Inkonsistenz: Bei Dateisystemen werden häufig dieselben

Daten/Informationen redundant gespeichert. Zu Inkonsistenzen kommt es, wenn nur eine Kopie der Daten geändert und die andere im veralteten Zustand belassen wird.

- Beschränkte Zugriffsmöglichkeiten: Informationen können bei isolierten Dateien wenn überhaupt nur schwer miteinander verknüpft werden.
- Probleme des Mehrbenutzerbetriebs: Daten werden häufig von mehreren Anwendern genutzt, was bei Dateisystemen, die keine oder nur sehr rudimentäre Kontrollmechanismen für den Mehrbenutzerbetrieb bieten, zu unerwünschten Anomalien führen kann.
- Sicherheitsprobleme: Nicht alle Benutzer sollen Zugriff auf alle Daten haben bzw. das Privileg, diese zu ändern.
- Integritätsverletzung: Eingeschränkte Bedingungen sind schwer zu überprüfen.
- Verlust von Daten: Datensysteme bieten bestenfalls die Möglichkeit einer periodisch durchgeführten Sicherung der Dateien, so dass Datenverluste, die während der Bearbeitung von Dateien oder nach der letzten Sicherungskopie auftreten, im Allgemeinen nicht auszuschließen sind.

### Datenbank

Eine Datenbank bzw. Datenbasis (DB) ist eine logisch zusammenhängende Sammlung von Daten (Datenbestand) mit einer bestimmten inhärenten Bedeutung und kann jede beliebige Größe und Komplexität aufweisen. Sie kann manuell oder computergestützt erzeugt und gepflegt werden (vgl. ELMASRI UND NAVATHE 2009).

Nach KEMPER UND EICKLER 2011 wird die Gesamtheit der Programme zum Zugriff auf die gespeicherten Daten, zur Kontrolle der Konsistenz und zur Modifikation der Daten als Datenbankverwaltungssystem (engl. database management system, abgek. DBMS) bezeichnet. Ein DBMS einschließlich einer oder mehrerer Datenbanken nennt man ein Datenbanksystem (DBS), wobei dieser Begriff auch als synonym für DBMS steht (vgl. RECHENBERG UND POMBERGER 2006).

Im Vergleich mit einem Dateisystem bietet ein Datenbanksystem folgende Vorteile (BENN 2005):

- Softwareunabhängigkeit: Gegenüber Dateisystemen, die Daten entsprechend ihrer Verwendung speichern, enthalten Datenbanken die Daten problembezogen und sind daher von der Verwendung der Daten unabhängig.
- Redundanzfreiheit: Aufgrund der zentralen Pflege des anwendungsunabhängigen Datenbestandes in einer Datenbank wird eine unkontrollierte Redundanz, wie sie bei Dateisystemen z.B. aufgrund von Kopieren auftritt, weitgehend verhindert.
- Inkonsistenzschutz: Die zentrale Pflege verhindert weitestgehend die Inkonsistenz.



- Flexibilität: Ein zentraler Datenbestand kann einfach nach diversen Kriterien ausgewertet werden, wohingegen dazu bei Dateisystemen schwierige bzw. aufwendige Anpassungen notwendig werden.
- Datenschutz: Ein zentraler Datenbestand kann sinnvoll und einfach vor unberechtigtem Zugang geschützt werden. In einem Dateisystem ist jeder Benutzer für den Schutz seiner Daten selbst zuständig.
- Beachtung von Standards: Die Durchsetzung und Einhaltung von Standards kann einfach gewährleistet werden (vgl. Elmasri und Navathe 2009).

Als Nachteile werden häufig hohe Anfangsinvestitionen für Hard- und Software sowie Schulungen der Nutzer genannt (vgl. ELMASRI UND NAVATHE 2009).

Die ursprüngliche Datenhaltung des GeoSN sah eine dateibasierte Speicherung vor. Die binären Rohdaten wurden epochenweise (standardmäßig 15 Minuten) für jeden Empfänger getrennt in die binären Logdateien (z.B. 1568\_0\_1.log, GPS Woche\_Sekunde\_Empfänger.log,) gespeichert. Nach Abschluss einer Epoche erfolgte die Weiterverarbeitung, deren Ergebnisse in eine Tagesdatei (z.B. 100516.gka) geschrieben wurden. Die Speicherung der Dateien zu Vorhaltungszwecken ist unter Anbetracht der Datenmengen nur im Binärformat sinnvoll (vgl. Abschnitt 4.2.2). Die durch Konvertierung erzeugten Dateien im für die Auswertung geforderten Format (z.B. ASCII), die aus den Binärdaten jederzeit wieder reproduzierbar sind, werden automatisiert nach erfolgter Auswertung gelöscht. Lediglich die Tagesdatei (gka-Format) wird im ASCII-Format archiviert, da sie u.a. für die Visualisierung benötigt wird.

Im Zuge der Weiterentwicklungen des GeoSN und der damit einhergehenden komplexeren Auswertung erfolgte eine Umstellung der Datenhaltung auf die zusätzliche Nutzung von Datenbanken, indem die Daten nach der Prozessierung sowohl in gka-Dateien als auch in die Datenbank geschrieben werden. Gerade im Falle einer supplementären Auswertung (siehe Abschnitt 3.5) wie z.B. Filterungen, Ausgleichungen etc. birgt eine dateibasierte Speicherung Nachteile gegenüber einer datenbankbasierten. Mit der datenbankbasierten Speicherung ist eine schnellere Verarbeitung der Daten (z.B. für das Qualitätsmanagement) möglich, da nicht mehr unzählige Dateien geöffnet und gelesen werden müssen. Ferner können die Zugriffsrechte leichter geregelt werden, da es z.B. bei der gka-Datei (Tagesdatei mit allen Epochenlösungen) Zugriffskonflikte geben kann, wenn während des aktuellen Tages auf diese Daten zugegriffen werden soll.

Weitere Vorteile sind die Möglichkeiten des Mehrnutzerbetriebs, der Nutzer- und Programmsicht (es ist mit DB möglich, dass nicht jeder alles sehen und/oder bearbeiten kann) und der Archivierung sowie die geringere Störungsanfälligkeit. Die Datenbank dient als zentrales Bindeglied der

unterschiedlichen Softwaremodule. Im Falle des GeoSN wird man dem Low-Cost Gedanken durch Nutzung einer MySQL Datenbank (Open Source) gerecht. Eine Datenbank weist darüber hinaus mit wachsender Größe des zu managenden Datenvolumens einen Performancegewinn gegenüber einem Dateisystem auf.

Für die Datenbankumsetzung des GeoSN wurde das im Anhang A 5 dargestellte Entity-Relationship-Model (ERM) entworfen, indem alle benötigten Entitäten (wie z.B. Station, Epoche oder Basislinie) mit ihren Eigenschaften, Beziehungen sowie Primär- und Fremdschlüsseln (PK - Primary Key, FK - Foreign Key) dargestellt sind. Die entworfene Datenbank beinhaltet z.B. folgende Tabellen:

- gnss\_epochs (epoch\_id, gnss\_week, gnss\_second, date, status\_id, comment)
- gnss\_stations (name, point\_type, receiver\_type, comment)
- gnss\_baseline (baseline\_id, station\_from, station\_to, comment)
- gnss\_baseline\_status (epoch\_id, baseline\_id, status\_id, comment)
- gnss\_coordinates (station\_id, WGS84\_X, WGS84\_Y, WGS84\_Z, WGS84\_B, WGS84\_L, WGS84\_height, GK\_R, GK\_H, GK\_height, comment)
- gnss\_rawdata (epoch\_id, baseline\_id, WGS84\_X, WGS84\_Y, WGS84\_Z, WGS84\_sX, WGS84\_sY, WGS84\_sZ, WGS84\_sPos, WGS84\_sHeight,...)
- gnss\_results (epoch\_id, station\_id, WGS84\_X, WGS84\_Y, WGS84\_Z, WGS84\_qxx, WGS84\_qxy, WGS84\_qxz, WGS84\_qyy, WGS84\_qyz, WGS84\_qzz,...)
- gnss\_measurements (epoch\_id, station\_id, status\_id, comment)

## **4.4 GeoSN Pilotprojekte**

### **4.4.1 Funktionsfähigkeitsnachweis Campus UniBwM**

Zur Verifizierung der Gesamtfunktionalität des Systems wurde ein Testaufbau am Campus der UniBwM durch PINK 2007 realisiert. Es kamen sieben CMC Smart Antennas Superstar II und zwei NovAtel OEM3 MiLLenium Boards jeweils in einer ProPak Version sowie ein CMC ALLSTAR-Board in einer Development Box in Verbindung mit einer Leica Chokering-Antenne zum Einsatz. Zwei der zehn Punkte fungierten als Referenz, die maximale Basislinienlänge betrug ca. 550 m und der maximale Höhenunterschied ca. 15 m. Die Netzkonfiguration, in der das System über einen mehrwöchigen Zeitraum kontinuierlich Daten aufzeichnete und online auswertete, ist in Abbildung 19 dargestellt.



Abbildung 19: Netzlayout des Testaufbaus (Kartengrundlage: Google Earth)

Bei den Untersuchungen zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit konnten für einen exemplarischen Zeitraum von 7 Tagen mittlere empirische Standardabweichungen der Epochenlösungen von ca. 6 mm und nach erfolgter Ausreißereliminierung und gleitender Mittelwertbildung über 5 Datensätze von 3 mm erreicht werden (vgl. PINK 2007).

Ein Soll-Ist Vergleich, bei dem die von einer Verfahrenseinheit mit einem Faulhaber Schrittmotor durchgeführten Bewegungen einer adaptierten Smart Antenna SSII den Ergebnissen mit dem Low-Cost GNSS Monitoring-System festgestellten Bewegungen gegenübergestellt wurden (siehe Abbildung 20), konnte zeigen, dass sich Bewegungen im Bereich weniger Millimeter nachweisen lassen. Weitere Details siehe PINK 2007, GLABSCH ET AL. 2009B und GÜNTHER ET AL. 2008.

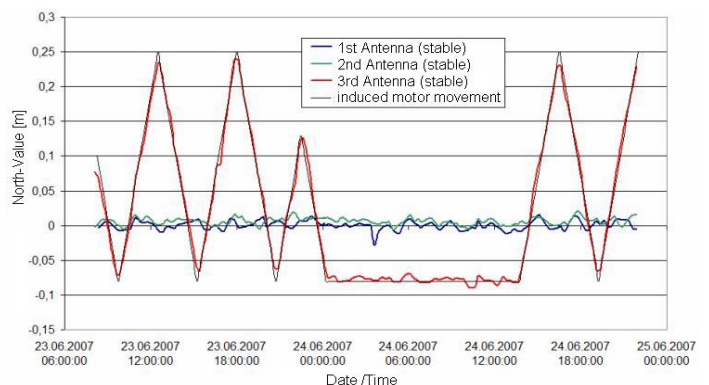
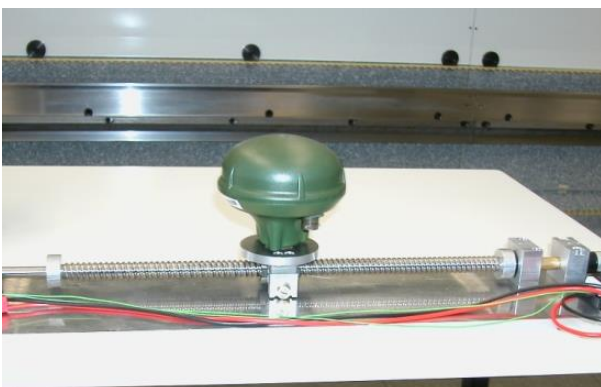


Abbildung 20: Soll-Ist Vergleich einer Bewegung; links: Aufbau, rechts: Ergebnis (PINK 2007)

#### 4.4.2 Pilotprojekt Hornbergl

Das als bergsturzgefährdet eingestufte Hornbergl (1755 m ü. NN) liegt südlich von Reutte im Tiroler Außerfern. Die Abbildung 21 zeigt einen Blick von Reutte auf das Hornbergl mit dem Gipfel (Höfener Kreuz), den Südost-Grad (Fauler Schrofen) und den dazwischenliegenden Bereich (Luag ins Land).

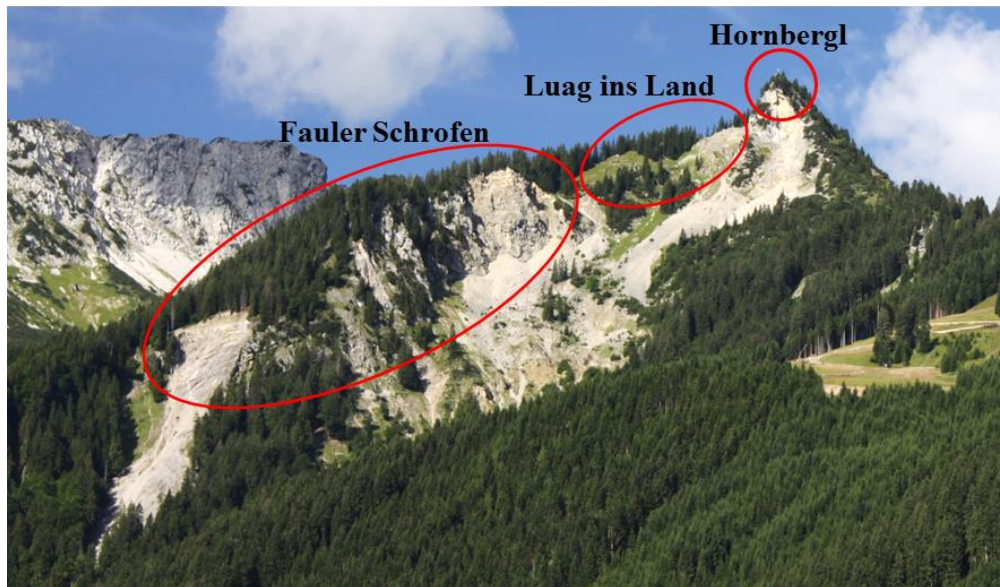
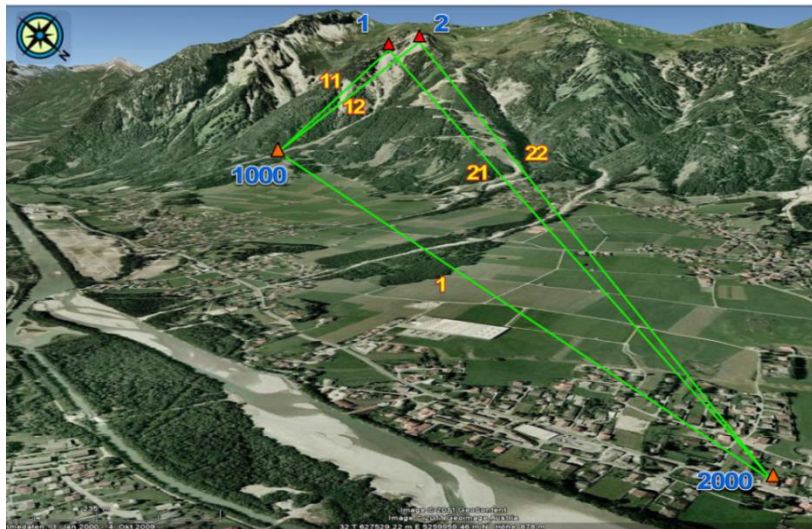


Abbildung 21: Blick von Reutte auf das Hornbergl

Nach einem größeren Murereignis wird das Gebiet des Hornbergl seit 1987 geodätisch überwacht (siehe MOSER ET AL. 2009). Bewegungen von bis zu 250 mm/a wurden festgestellt. Das Ausmaß der Bergzerreißung ist anhand zahlreicher Spalten und Klüfte vor allem im Gebiet Luag ins Land erkennbar. Nach KIRSCHNER 2006 sind zwei verschiedene Hauptbewegungsmuster zu unterscheiden. Zum einen ein großräumiges Absetzen der Hauptmasse (bestehend aus Luag ins Land und Fauler Schrofen) vom Höfener Kreuz und zum anderen ein kleinräumigeres Bewegungsmuster, welches durch Abgleiten und Kippen der Körper entlang von Gleitflächen entsteht. Touristische Attraktionen (z.B. das Skigebiet nördlich und westlich des Hornbergl) sind von den Felsstürzen nicht gefährdet, aber die nach Osten abstürzenden Massen könnten im Talbereich (Gemeinde Höfen) von Relevanz sein. Für weitere Informationen sei auf KIRSCHNER 2006 verwiesen.

Im Juni 2007 wurde das Low-Cost GNSS Monitoring-System im Rahmen des Forschungsvorhabens „Entwicklung, Installation und Erprobung eines GPS-gestützten online Überwachungssystems am Hornbergl, Tirol“ für die Wildbach- und Lawinerverbauung, Gebietsbauleitung Außerfern am Hornbergl installiert. Mit Hilfe des Permanent-Systems sollen Informationen über den Zustand der Rutschung vorliegen, um u.a. Haupttrigger der Bewegung zu identifizieren. Bei starker

Beschleunigung der Rutschung und akuter Gefahr eines Massensturzes ist eine rechtzeitige Warnung angestrebt.



**Abbildung 22: Netzlayout des Low-Cost GNSS Monitoring-Systems am Hornberg  
(Kartengrundlage: Google Earth)**

Die Abbildung 22 zeigt die Anordnung der Sensorknoten #1 und #2 im Deformationsgebiet des Luag ins Land auf ca. 1700 m ü. NN, die ursprüngliche Referenzstation (#1000) im Tal auf ca. 900 m ü. NN an der alten Seilbahn-Talstation und die neue, 2016 installierte Referenzstation (#2000) am Gebäude der Wildbach- und Lawinenverbauung in Lechaschau, die dort aufgrund des Neubaus der Seilbahn erforderlich wurde.

Einige Kenngrößen der einzelnen Basislinien sind in Tabelle 12 dargestellt. Basislinienlängen von über 4 km stellen hohe Anforderungen an eine zuverlässige drahtlose Datenübertragung bei jeder Witterung (starke Dämpfung bei Regen, Nebel und Schneefall). Bedingt durch die exponierte Lage mit umliegenden Berggipfeln (siehe Abschattungsmasken in der Abbildung 36) herrschen teilweise sehr ungünstige GPS Empfangsbedingungen, die in Kombination mit den großen Höhenunterschieden von bis zu 862 m eine Herausforderung an die Datenauswertung stellen.

**Tabelle 12: Kenngrößen der Basislinien – Projekt Hornberg**

Basislinien ID	Referenzpunkt	Objektpunkt	Länge der Basislinie	Höhenunterschied der Basislinie
11	1000	1	2173 m	732 m
12	1000	2	2242 m	784 m
21	2000	1	4272 m	810 m
22	2000	2	4334 m	862 m

Ferner ist aufgrund der alpinen Lage mit witterungsbedingten Beeinträchtigungen beim Systembetrieb zu rechnen (siehe Abbildung 23). Steinschlaggefahr und Schneehöhen von mehr als 2 m erfordern einen robusten Stationsaufbau (massive Masten mit ausreichender Höhe, entsprechender Autarkiefaktor der Stromversorgung und widerstandsfähige Einhausung der Elektronik). Trotz sorgfältiger Berücksichtigung der genannten Anforderungen kommt es bei extremen Wetterlagen durch Bildung von Schneewechten zu einem Einschneien der Sensorknoten, woraus verfälschte Positionen, Engpässe bei der Stromversorgung und Unterbrechungen der WLAN Datenübertragung resultieren.



**Abbildung 23: Winter- und Sommerimpressionen der Sensorknoten #1 und #2**

Mittlerweile sind Daten von ca. 10 Jahren vorhanden, anhand derer Aussagen über den langfristigen Bewegungsverlauf getroffen werden können. In der Abbildung 24 sind die Zeitreihen auf Basis einer robusten Filterung (gleitender Mittelwert, L1 Normschätzung, Lage: 48 Epochen, Höhe: 96 Epochen) der beiden Objektpunkte (#1 und #2) für den Zeitraum 14.07.2007 – 31.05.2013 dargestellt. Beide Punkte weisen Verschiebungen auf, die unterschiedlich stark ausfallen. Die ungleiche Skalierung beider Graphiken ist zu beachten. Neben dem starken Setzungsverhalten ist für beide Punkte ein ansteigender Rechtswert und ein abnehmender Hochwert ersichtlich, was aufgrund der geographischen Orientierung einer talwärts gerichteten Bewegung entspricht. Im dargestellten

Zeitraum beträgt die Bewegung für Punkt #1 ca. 15 cm, 8 cm bzw. 21 cm (R, H bzw. h) und für Punkt #2 ca. 99 cm, 39 cm bzw. 79 cm (R, H bzw. h). Nachdem bei satellitengestützten Messungen die Höhe immer die schwächste Koordinatenkomponente ist, weisen deren Zeitreihen gegenüber denen der Lagekomponenten eine etwa um den Faktor 3 schlechtere Genauigkeit auf. Dies kann durch eine größere Filterlänge teilweise kompensiert werden.

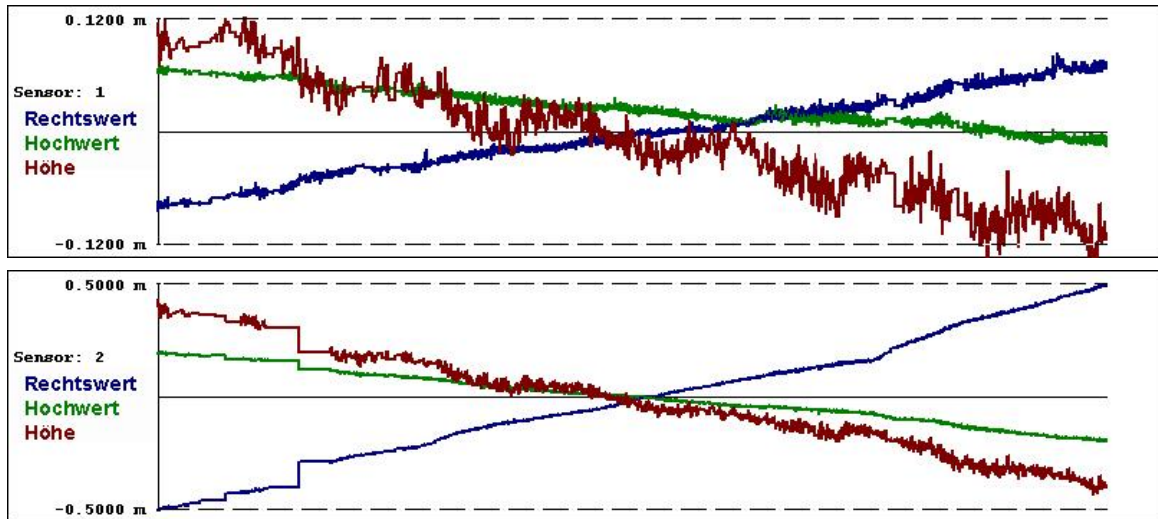


Abbildung 24: Hornbergl-Zeitserien von #1 und #2 für den Zeitraum 14.07.2007-31.05.2013  
(Gleitender Mittelwert, L1 Normschätzung, Lage: 48 Epochen, Höhe 96 Epochen)

In den Zeitreihen sind vereinzelte Änderungen der Charakteristik zu erkennen, die sich anhand einer quartalsweisen Darstellung der Bewegungsraten (vgl. Abbildung 25) näher spezifizieren lassen.

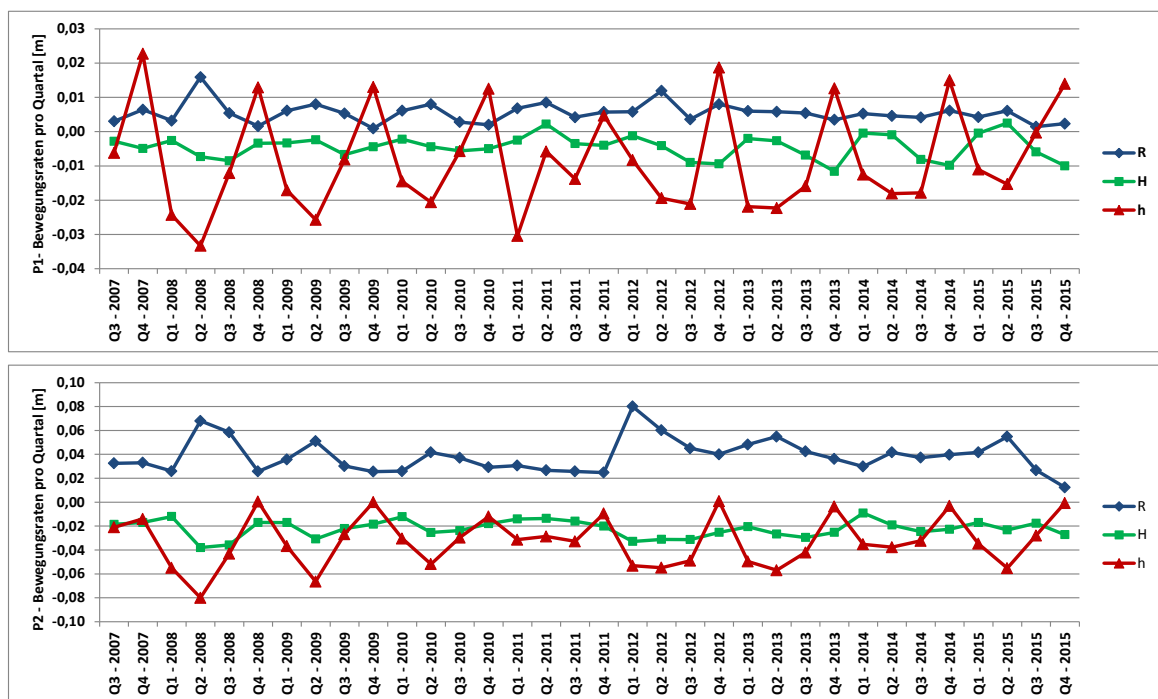


Abbildung 25: Quartalsweise Bewegungsraten für Punkt #1 und #2 Zeitraum: 2007-2015

Jeweils im Frühjahr zur Schneeschmelze (Q2) tritt in allen Koordinatenrichtungen eine Beschleunigung auf, während sich die Bewegungen in den Wintermonaten (Q4) konsolidieren. Eine Verifizierung der Ergebnisse des Low-Cost GNSS Monitoring-Systems ist durch einen Vergleich mit den Ergebnissen der Netzmessungen, die regelmäßig einmal pro Jahr in Zusammenarbeit mit der TU München, Lehrstuhl für Geodäsie durchgeführt werden, möglich. Die aus den beiden Messverfahren bestimmten Punktbewegungen für den Zeitraum zwischen Juni 2009 und September 2010 (Epoche 10 und Epoche 11) sind mit den Differenzbeträgen in der Tabelle 13 dargestellt. Maximale Abweichungen in der Lage von 0,8 cm und für die Höhe von 1,2 cm zeigen, dass mit dem Low-Cost GNSS Monitoring-System Punktbewegungen im Zentimeterbereich aufgedeckt werden können (HEUNECKE ET AL. 2011A).

**Tabelle 13: Vergleich von epochaler und permanenter Messung (HEUNECKE ET AL. 2011A)**

Punktbewegung	R <sub>1</sub> [cm]	H <sub>1</sub> [cm]	h <sub>1</sub> [cm]	R <sub>2</sub> [cm]	H <sub>2</sub> [cm]	h <sub>2</sub> [cm]
Netzmessung	2,5	-1,9	-2,9	16,2	-9,6	-14,2
Low-Cost System	2,3	-2,4	-4,1	16,4	-10,4	-14,8
Differenzbetrag	0,2	0,5	1,2	0,2	0,8	0,6

Neben der hohen Qualität der Ergebnisse konnte mit dem Projekt „Hangüberwachung Hornberg!“ insbesondere auch die Zuverlässigkeit des Systems im Ganzjahresbetrieb unter widrigen Bedingungen nachgewiesen werden. Diese ist beispielhaft anhand der Ausfallstatistik für das Jahr 2010 (vgl. Tabelle 14) zu erkennen, in der alle Ausfalltage (Tage, an denen eine Datenaufzeichnung für weniger als 12 h erfolgt ist) sowie die daraus resultierenden Ausfallraten von 6,3% bzw. 11,0% dokumentiert sind. Die Verteilung der Ausfalltage zeigt, dass diese in erster Linie in den Wintermonaten auftreten und daher überwiegend bis ausschließlich witterungsbedingter Art sind. Eine Optimierung der Energieversorgung, z.B. der Einsatz einer Brennstoffzelle zur Erhöhung des Autarkiefaktors würde zu einer Reduktion solcher Ausfälle führen.

**Tabelle 14: Statistik der Ausfalltage 2010 (HEUNECKE ET AL. 2011A)**

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ	Ausfall [%]
# 1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	16	23	6.3
# 2	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	13	21	40	11.0

Für weitere Informationen zum Projekt siehe GÜNTHER ET AL. 2008, GLABSCH ET AL. 2009A sowie GLABSCH ET AL. 2010A.



#### 4.4.3 Pilotprojekt Sudelfeld

Die Hangbewegung Aggenalm liegt in einer Höhe von ca. 1100 m ü. NN. im Sudelfeldgebiet (Mangfallgebirge) nahe Bayrischzell und ist ca. 700 m lang und 250 m breit (vgl. Abbildung 26). Seit 2001 werden vom Bayerischen Landesamt für Umwelt tachymetrische Überwachungsmessungen in regelmäßigen Abständen durchgeführt, anhand derer Bewegungsraten in der Größenordnung von ca. 1 cm bis 2 cm pro Jahr bestimmt wurden (GALLEMANN 2008). Für detaillierte Informationen zur Geologie siehe JUNG 2007.

Im Rahmen des im Geotechnologien Programm vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes „Entwicklung und Erprobung eines integrativen 3D Frühwarnsystems für alpine instabile Hänge“ (alpEWAS) wurde im August 2008 die Low-Cost GNSS Überwachungskomponente als Bestandteil eines integrativen Monitoring-Systems installiert. Details zum Projekt siehe u.a. THURO ET AL. 2011A.

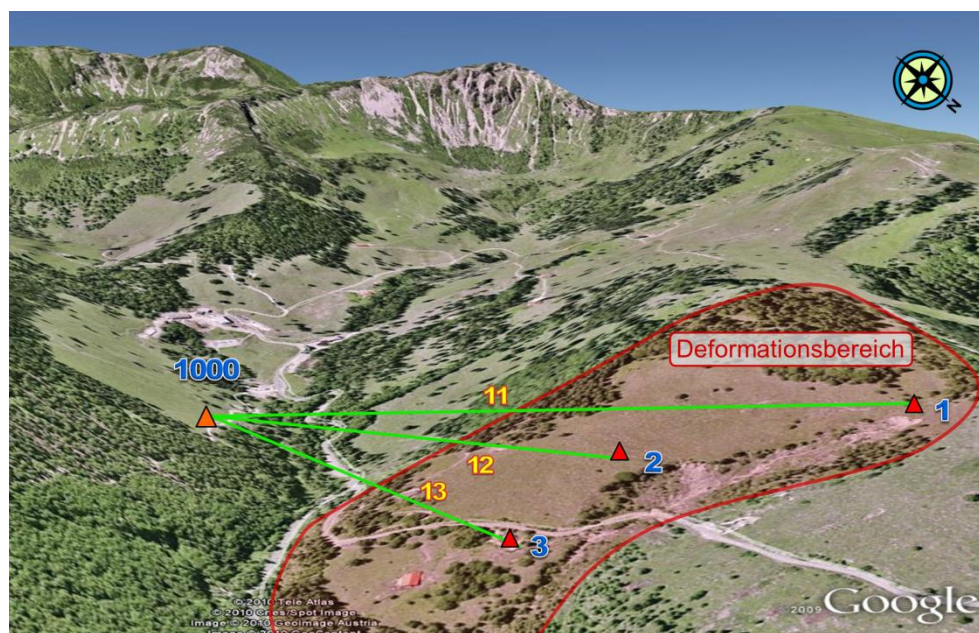


Abbildung 26: Netzlayout des Low-Cost GNSS Monitoring-Systems am Sudelfeld  
(Datengrundlage: Google Earth)

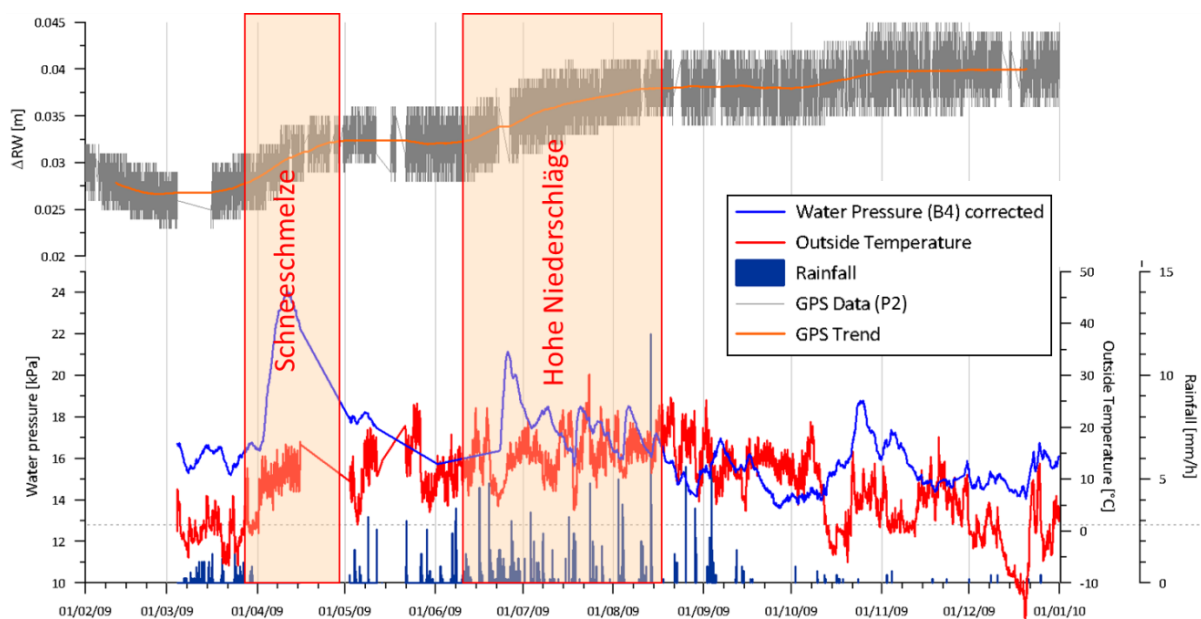
Die Abbildung 26 zeigt die Lage der Referenzstation #1000 und der drei Objektpunkte (#1, #2 und #3). Anders als im Projekt „Hornbergl“ sind die Basislinien mit einer maximalen Länge von 670 m deutlich kürzer und die Höhenunterschiede mit maximal 78 m erheblich geringer (vgl. Tabelle 15). Die Abschattungsbedingungen der GNSS Sensorknoten sind aufgrund der Kessellage des Gebietes und dem Umstand, dass lediglich der Gegenhang als stabiler Standort für die Referenz in Frage kam, als verhältnismäßig schlecht einzustufen (vgl. Abschattungsmaske in Abbildung 36). Es wurde die

neue Empfängergeneration NovAtel Smart Antenna V1G mit GLONASS-Funktionalität und einer höheren Genauigkeit der Trägerphasenmessung (vgl. Tabelle 4) eingesetzt.

**Tabelle 15: Kenngrößen der Basislinien am Sudelfeld**

Basislinien ID	Referenzpunkt	Objektpunkt	Länge der Basislinie	Höhenunterschied der Basislinie
11	1000	1	670 m	78 m
12	1000	2	458 m	29 m
13	1000	3	459 m	28 m

Zusätzlich zu den gewonnenen GNSS Daten stehen dank des integrativen Ansatzes des Monitoring-Systems weitere Messdaten (z.B. Temperaturen, Porenwasserdrücke und Niederschlagsmengen) zur Verfügung, anhand derer die für die Bewegung ursächlichen Trigger abgeleitet werden konnten. Der Porenwasserdruck wurde als Haupttrigger identifiziert. Oberhalb eines bestimmten Wertes ist mit einer Beschleunigung der talwärts gerichteten Bewegung zu rechnen, was sich aufgrund der Falllinien-Ausrichtung Ost-Südost hauptsächlich in einem Anstieg des Rechtswertes (vgl. Abbildung 27) widerspiegelt (siehe THURO ET AL. 2011A).



**Abbildung 27: Messreihen Sudelfeld Zeitraum 02.2009 – 01.2010 (THURO ET AL. 2011A)**

#### 4.4.4 Pilotprojekt Schiffshebewerk Scharnebeck

Das Schiffshebewerk Scharnebeck (siehe Abbildung 28) ist ein Doppelhebewerk, welches 35 km südöstlich von Hamburg am Elbe-Seitenkanal liegt.

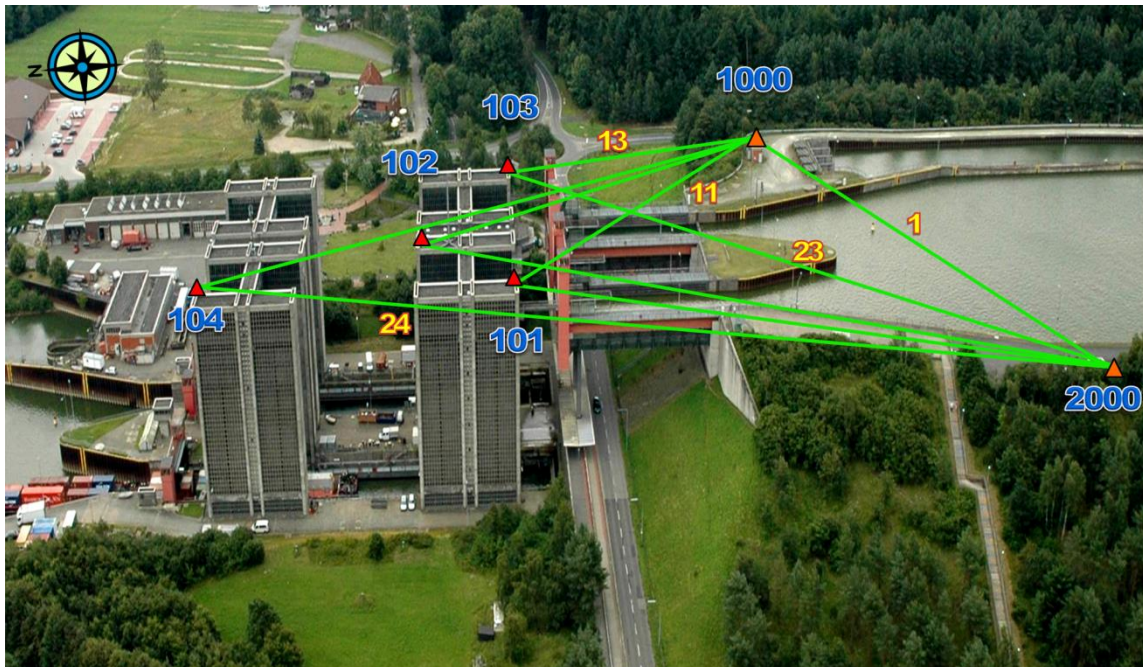


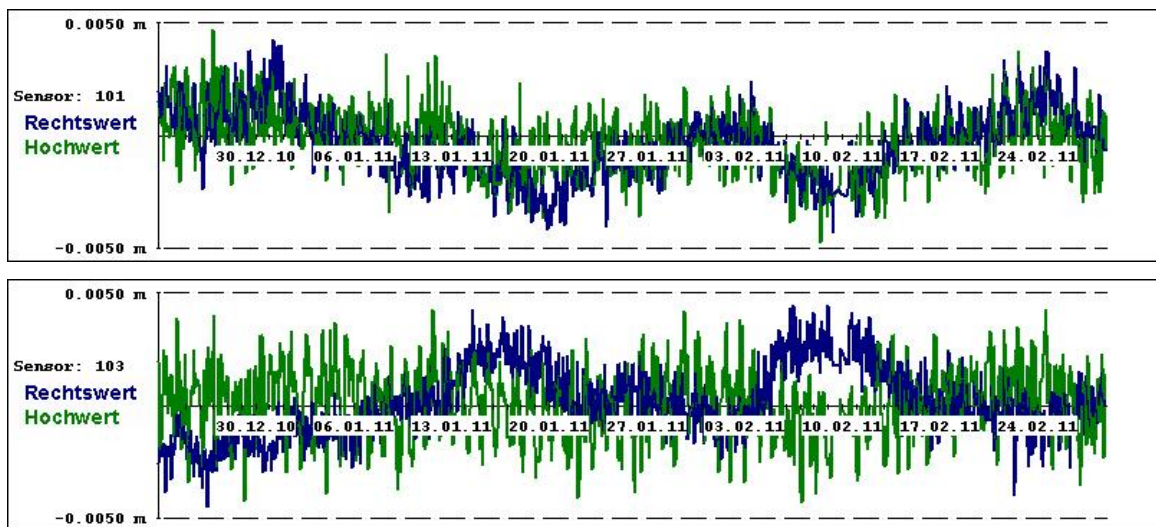
Abbildung 28: Netzlayout des Low-Cost GNSS Monitoring-Systems am Schiffshebewerk Scharnebeck  
(Datengrundlage Google Earth)

Auf den Türmen des Schiffshebewerks wurden für das Pilotprojekt vier Objektpunkte (#101 bis #104) vermarktet. Weiterhin wurden zwei Referenzstationen (#1000 und #2000) auf der südlichen Seite des Schiffshebewerks auf der Verschlussstation und auf einer Pegelmessstelle installiert. Es ergab sich das in der Abbildung 28 dargestellte Netzlayout. Die Umgebungsbedingungen sowie die Lage der Sensorknoten bieten mit Basislinienlängen von maximal 237 m, Höhenunterschieden von maximal 6 m und nur geringen Abschattungen optimale Voraussetzungen für gute Ergebnisse auf Grundlage von GNSS Beobachtungen (vgl. Tabelle 16). Während des ca. 10 monatigen operativen Systembetriebs traten u.a. aufgrund der Tatsache, dass alle Sensorknoten über einen Feststromanschluss verfügten, keine Systemausfälle auf. Im Zuge von Sanierungsmaßnahmen am Hebewerk wurde der Betrieb des Systems im Herbst 2011 eingestellt.

**Tabelle 16: Kenngrößen der Basislinien am Schiffshebewerk Scharnebeck**

Basislinien ID	Referenzpunkt	Objektpunkt	Länge der Basislinie	Höhenunterschied der Basislinie
11	1000	1	112 m	4 m
12		2	120 m	4 m
13		3	84 m	4 m
14		4	183 m	4 m
21	2000	1	152 m	6 m
22		2	184 m	6 m
23		3	171 m	6 m
24		4	237 m	6 m

In der Abbildung 29 sind die Zeitreihen der Lagekomponenten der Objektpunkte #101 und #103 für den Zeitraum 23.12.2010 – 28.02.2011 aufgetragen. Das Rauschen der Zeitreihen ist  $\leq 5$  mm und es sind Bewegungen im Bereich weniger Millimeter ersichtlich, wobei die Verläufe der Rechtswerte beider Punkte gegenläufig zueinander sind. Aufgrund ihrer Lage bedeutet dies, dass sich die Punkte aufeinander zu bzw. sich voneinander weg bewegen, was einer Dehnung bzw. einer Stauchung des Bauwerkes in Ost-West-Richtung entspricht.

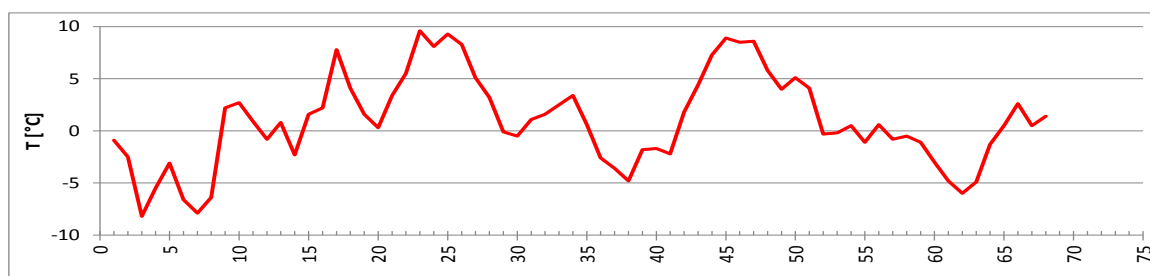


**Abbildung 29: Zeitreihen der Lagekomponenten von #101 und #103 für den Zeitraum 23.12.2010 – 28.02.2011 (Gleitender Mittelwert, L1 Normschätzung, 12 Epochen)**

Der Bewegungsverlauf lässt sich verifizieren, wenn man nach Formel 4.1 (vgl. WEB 9) mit einem Ausdehnungskoeffizienten für Stahlbeton von  $\alpha_T = 1 \cdot 10^{-5}$  eine Längenänderung von 5,6 mm bei einer Temperaturänderung von 20 °C für ein als starr angenommenes Bauteil mit einer Länge von 28 m (Breite eines Turmes, vgl. Abbildung 28) überschlägt:

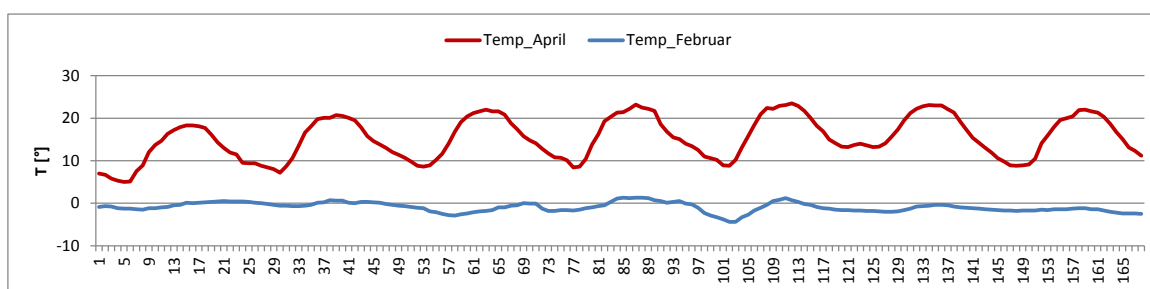
$$\Delta l = \pm \alpha_T \cdot \Delta T \cdot l_0 \quad (4.1)$$

Mit den Tagesmitteltemperaturen der sich in der Nähe befindenden Wetterstation Hamburg Fuhlsbüttel (vgl. Abbildung 30, DWD 2011), zeigt sich eine gute Übereinstimmung des Verlaufs mit der Variation der Rechtswerte. Während der Rechtswert von #103 dem der Temperatur folgt, ist der Rechtswert von #101 gegenläufig. Aufgrund der zunehmenden Temperatur dehnen sich die Stahlbetonbrücken aus (Zunahme Rechtswert #103, Abnahme Rechtswert #101).



**Abbildung 30: Tagesmitteltemperaturen Wetterstation Hamburg Fuhlsbüttel für den Zeitraum 23.12.2010 – 28.02.2011**

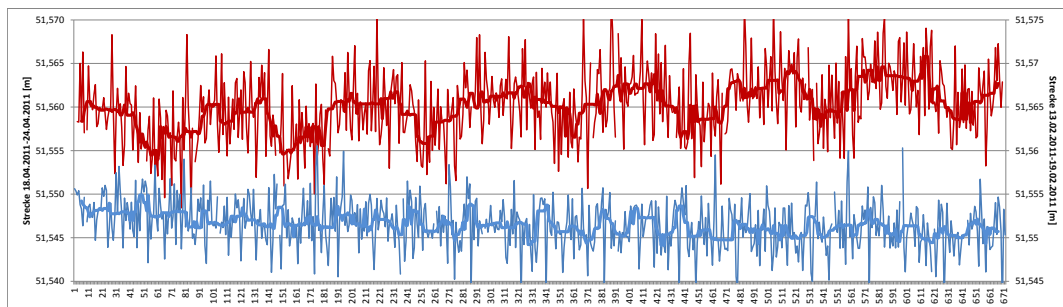
Mit einer weiteren Untersuchung kann der Einfluss von Temperaturänderungen (Tagesgang) analysiert werden. Anhand der stündlich gemittelten Temperaturen der Wetterstation Lüneburg wurden die in Abbildung 31 dargestellten 7-tägigen Zeiträume, einmal mit großen Temperaturschwankungen (18.04.-24.04.2011) und einmal mit geringen Temperaturschwankungen (13.02.-19.02.2011) ausgewählt und jeweils der Verlauf von Temperatur- und Positionsänderung (bzw. Streckenänderung) verglichen.



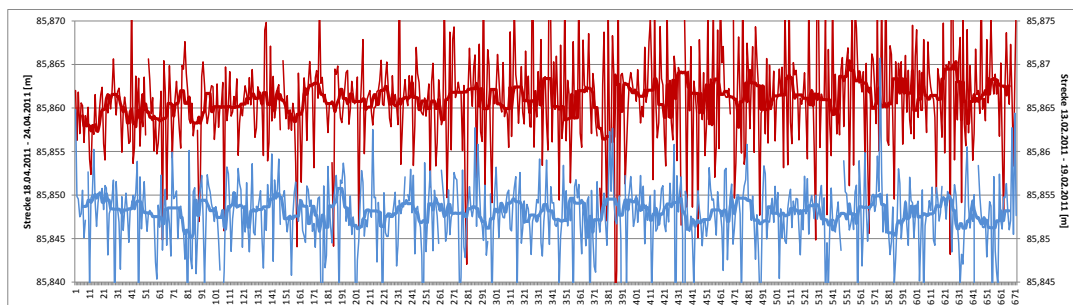
**Abbildung 31: Stundenmitteltemperaturen Wetterstation Lüneburg für die Zeiträume 13.02.2011 – 19.02.2011 (blau) und 18.04.2011 – 24.04.2011 (rot)**

Während in den Zeitreihen der Koordinaten ein temperaturabhängiger Tagesgang nicht klar ersichtlich ist, tritt dieser bei der Betrachtung der Strecke zwischen #101 und #103 für den Zeitraum mit den starken Temperaturänderungen (18.04.2011 – 24.04.2011) phasenverschoben deutlich hervor (vgl. Abbildung 32). Die Strecke zwischen #101 und #104 ist hingegen bei beiden Zeiträumen relativ konstant (vgl. Abbildung 33), da die Bauteile, auf denen sich die Punkte befinden, nicht miteinander

verbunden sind und sich die Punkte somit nicht aufgrund einer Stauchung oder Dehnung gegeneinander bewegen (vgl. Abbildung 28).

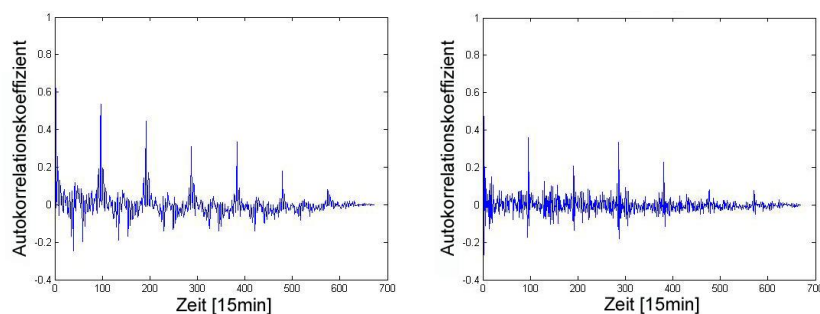


**Abbildung 32: Darstellung der Strecke #101 - #103 aus Epochenlösung und als gleitender Mittelwert L1 Norm über 11 Epochen für die Zeiträume 13.02.2011 – 19.02.2011 (blau) und 18.04.2011 – 24.04.2011 (rot)**



**Abbildung 33: Darstellung der Strecke #101 - #104 aus Epochenlösung und als gleitender Mittelwert L1 Norm über 11 Epochen für die Zeiträume 13.02.2011 – 19.02.2011 (blau) und 18.04.2011 – 24.04.2011 (rot)**

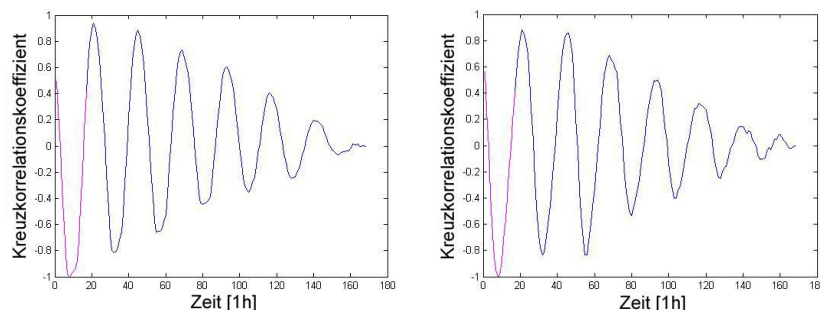
Ein Zusammenhang zwischen den beobachteten Streckenänderungen und der Änderung der Umgebungstemperatur lässt sich durch die Verwendung von Auto- und Kreuzkorrelationsfunktionen (vgl. Abschnitt 3.5.2) verifizieren. Beispielhaft wurden hierzu für die Lagekomponenten des Objektpunktes #101 (Wa1 Auswertung, GPS & GLONASS) für die Woche vom 18.04.2011 – 24.04.2011 (Zeitraum mit starken Temperaturänderungen, vgl. Abbildung 31) die Autokorrelationsfunktionen bestimmt (vgl. Abbildung 34).



**Abbildung 34: Autokorrelationsfunktion für die Lagekomponenten von #101 vom Pilotprojekt Scharnebeck (links: Rechtswert, rechts: Hochwert)**

Ein Tagesgang ist in beiden Koordinatenkomponenten deutlich zu erkennen. Die Beobachtungen (Epochenlösungen) sind demnach farbig korreliert, die Korrelation ist bedingt durch die sich wiederholende Satellitenkonstellationen (siderischer Tag), wiederkehrende Multipatheffekte, Temperaturschwankungen sowie andere mögliche äußere Einflüsse. Jedoch ist eine Trennung der einzelnen Einflüsse nicht möglich.

Bei visueller Betrachtung der Zeitreihen konnte kein Zusammenhang zwischen den Temperaturschwankungen im Tagesgang und den Koordinaten festgestellt werden. Aus diesem Grund wird mit Hilfe der Kreuzkorrelationsfunktion ein Zusammenhang zwischen der Stundenmitteltemperatur (vgl. Abbildung 31) und den Lagekomponenten (1h-Lösung) des Objektpunktes #101 für den oben genannten Zeitraum beispielhaft untersucht (vgl. Abbildung 35).



**Abbildung 35: Kreuzkorrelationsfunktion Temperatur und Lagekomponenten von #101 vom Pilotprojekt Scharnebeck (links: Rechtswert, rechts: Hochwert)**

Es ist zu erkennen, dass beide Koordinatenkomponenten mit der im Tagesgang variierenden Stundenmitteltemperatur korreliert sind, wobei sich die Korrelation mit der Zeit abschwächt und bei Rechts- und Hochwert phasenverschoben auftritt.

Für Details zum Projekt wird auf GLABSCH ET AL. 2011A, GLABSCH ET AL. 2011B und THURO ET AL. 2011B verwiesen.

## 4.5 Erfahrungen aus den Pilotprojekten

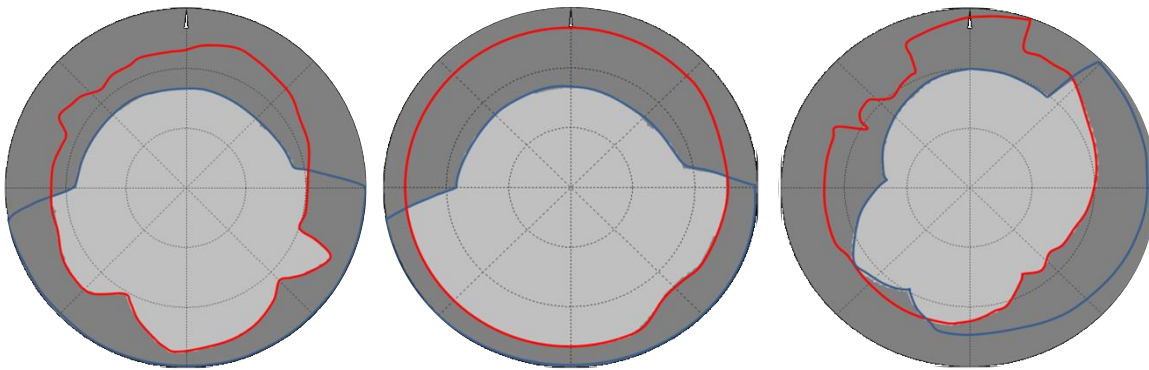
Insbesondere mit dem Projekt Scharnebeck konnte die Leistungsfähigkeit von Low-Cost GNSS Empfängern nachgewiesen werden, da hier nicht nur langfristige Bewegungstrends sondern auch kleine Bewegungen in kürzeren Zeiträumen detektiert werden konnten.

**Tabelle 17: Exemplarische Basislinienlösungen im Projektvergleich**

Projekt	Basislinie	Basislinienlösungen		Empir. Standardabweichung der Epochenslösungen (1h-Lösung) [mm]		1) Max. Basislinienlänge 2) Max. Höhenunterschied 3) Abschattungsbedingung
		Verfügbar	Verwertbar	Lage	Höhe	
Hornbergl Juni 2010	11	98,4 %	63,5 %	4,4	12,2	1) 2242 m 2) 785 m 3) ungünstig - mittelmäßig
	12	99,6 %	66,1 %	4,6	11,9	
Hornbergl Mai 2012	21	99,6 %	71,5 %	3,4	11,6	1) 4334 m 2) 862 m 3) mittelmäßig - gut
	22	99,8 %	76,6 %	4,3	12,1	
Sudelfeld Juni 2010	11	90,9 %	58,9 %	4,8	8,6	1) 670 m 2) 78 m 3) ungünstig - gut
	12	85,3 %	70,4 %	3,7	7,7	
	13	93,2 %	83,1 %	3,8	7,2	
Scharnebeck 26.12.10 - 15.01.11	11	99,9 %	98,7 %	3,0	5,3	1) 104 m 2) 10 m 3) sehr gut
	12	99,9 %	98,7 %	2,9	5,2	
	13	100 %	99,4 %	3,1	4,8	
	14	100 %	99,4 %	2,5	4,6	

Die Zuverlässigkeit des Systembetriebs ist u.a. an der prozentualen Anzahl der verfügbaren Basislinienlösungen (vgl. Tabelle 17) erkennbar, von denen nach einer Ausreißereliminierung in Abhängigkeit vom Projekt zwischen 58,9 % und 99,4 % an verwertbaren Basislinienlösungen verbleiben. Ursächlich hierfür sind insbesondere die Abschattungsbedingungen, die bei den Projekten zwischen „sehr gut“ (Scharnebeck) und „ungünstig“ (Hornbergl/Sudelfeld) variieren (vgl. Tabelle 17). In der Abbildung 36 sind die Abschattungsmasken der Basislinien 12 und 22 vom Hornbergl sowie die der Basislinie 11 vom Sudelfeld dargestellt. Die Abschattungsbedingungen am Sudelfeld sind aufgrund der Lage der Stabil- und Objektpunkte auf gegenüberliegenden Hängen ungünstig. Am Hornbergl ist die Horizontfreiheit an den Objektpunkten durch umliegende Berggipfel eingeschränkt, die jedoch aufgrund der nördlichen Lage keine große Auswirkung haben. Konstellationsbedingt stehen im Norden weniger Satelliten (Nordloch) als im Süden zur Verfügung. In Folge dessen ergeben sich im Vergleich zum Projekt in Sudelfeld günstigere Abschattungsbedingungen, die durch den Wechsel der Referenz (zu Lasten einer deutlich längeren Basislinie) weiter verbessert wurden.





**Abbildung 36: Abschattungsmasken kombiniert aus Referenzstation (rot) und Objektpunkt (blau)**  
**(links: Hornbergl Basislinie 12, Mitte: Hornbergl Basislinie 22, rechts: Sudelfeld Basislinie 11)**

Neben der Anzahl der verwertbaren Basislinien und den Abschattungsbedingungen haben insbesondere die Basislinienlänge sowie der Höhenunterschied einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Epochenlösungen (vgl. Tabelle 17). Obwohl die Abschattungsbedingungen der Basislinien 21 und 22 gegenüber den Basislinien 11 und 12 am Hornbergl günstiger sind, ergeben sich aufgrund der Verdopplung der Basislinienlänge von ca. 2 km auf ca. 4 km nach Formel 3.24 vergleichbare Standardabweichungen mit ca. 4 mm für die Lage und 12 mm für die Höhe bei den Epochenlösungen. Deutlich kürzere Basislinien und ein maximaler Höhenunterschied von 78 m führen bei den Projekten Sudelfeld und Scharnebeck zu empirischen Standardabweichungen von ca. 3 mm für die Lage und ca. 5 mm für die Höhe bei den Epochenlösungen. Lediglich die Basislinie 11 am Sudelfeld weist durch ihre ungünstigen Abschattungsbedingungen (vgl. Abbildung 36 rechts) ein schlechteres Resultat auf.

Die eingesetzten Hardwarekomponenten wurden in den Pilotprojekten auch unter widrigen Bedingungen erprobt. Lediglich bei dem Pilotprojekt Hornbergl ist bei einer NovAtel Smart Antenna SSII, vermutlich weil sie während eines Winters tagelang komplett eingeschneit war, ein Defekt aufgetreten obwohl sie dem Mil-Standard entspricht. Eine Möglichkeit der Vermeidung wäre von der gekapselten Variante (den Enclosures) abzugehen, um den empfindlicheren Empfänger geschützt mit den anderen Komponenten in der Box unterzubringen und nur die robusteren Antennen den Umgebungsbedingungen ungeschützt ausgesetzt zu lassen.

## 4.6 Weitere Low-Cost GNSS Monitoring-Systeme

Eine Unterteilung von GNSS Monitoring-Systemen kann nach dem Kostengesichtspunkt der verwendeten Sensorik (Low-Cost vs. High-End), dem Auswerteverfahren (Echtzeit vs. Postprocessing) oder beispielsweise nach dem Entwickler („Selfmade“ vs. Industrie) erfolgen.

Nachfolgend werden ausgewählte GNSS Monitoring-Systemen, die den Low-Cost Gedanken verfolgen, aufgeführt und mit ihren wesentlichen Eigenschaften beschrieben, soweit diese eruiert werden konnten.

- FH Bochum: SMMS

Das Slow-Motion-Measuring-System (SMMS) wurde 1995 an der FH Bochum für die Erfassung von langsamen Bewegungen ( $< 10$  cm/Minute) unter Verwendung von Einfrequenz-Empfängern und der Auswertung von Code- und Phasenmessungen entwickelt. Nach einer bis zu 20 Minuten andauernden Systeminitialisierung (einmalige Bestimmung der Trägerphasenmehrdeutigkeiten) stehen im 10-Sekundentakt Lösungen zur Verfügung, die rekursiv geglättet und alle 100 Sekunden als 3D Position gespeichert werden. Mittels Filtermethoden (z.B. gleitender Mittelwert) ist die Berechnung von Stundenmitteln (1 h, 6 h, 12 h, 24 h) möglich. Für eine kontinuierliche Beobachtungszeit von 12 Stunden wird die Standardabweichung einer 3D Koordinate mit ca. 1 mm angegeben. Berichte von den Praxiseinsätzen an der Bever-Talsperre, der Edertalsperre und dem Wehr Kostheim finden sich in BÄUMKER UND FITZEN 1998, BACKHAUSEN ET AL. 2000, FITZEN UND BÄUMKER 2006 und FITZEN UND BÄUMKER 2009.

- TU Graz, Institut für Angewandte Geodäsie: IVM-CODMS

Am Institut für Angewandte Geodäsie, Abteilung für Ingenieurvermessung und Messtechnik (IVM) der TU Graz wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes das IVM-CODMS (continuously operating GPS deformation monitoring system) entwickelt, um langsame Punktbewegungen in Near Realtime aufzudecken. Das Messkonzept basiert auf der Nutzung von Zweifrequenz-Empfängern auf den Referenzstationen und Einfrequenz-Empfängern auf den Roverstationen jeweils in Verbindung mit einer Chokering-Antenne. Die im 3-Sekundentakt aufgezeichneten Daten werden mit der entwickelten Software Grazia ausgewertet. Die erreichbaren Genauigkeiten sind mit 2 mm für die Lage und 5 mm für die Höhe angegeben (HARTINGER 2001). Weitere Informationen zu den Anwendungen bei der Hang- und Bauwerksüberwachung finden sich in HARTINGER UND BRUNNER 2000, HARTINGER 2001, BRUNNER ET AL. 2000A, BRUNNER ET AL. 2000B, BRUNNER ET AL. 2003 und LANZENDÖRFER 2007.

- FH Karlsruhe: GOCA

Das GPS basierte online Kontroll- und Alarmsystem (GOCA) wurde im Rahmen des gleichnamigen Forschungs- und Entwicklungsprojekts an der Fachhochschule Karlsruhe zur Echtzeitüberwachung von Bewegungen an der Erdoberfläche entwickelt. Zu den Grundfunktionalitäten des Systems zählen die Zeitreihenanalyse und –visualisierung, die Deformationsanalyse und ein Alarmmanagement. Die benötigten Positionsdaten werden über die ASCII Software-Schnittstelle (gka-Format) integriert, wobei der Einsatz verschiedener Sensorik (z.B. GNSS und TPS) möglich ist. Die Sensoransteuerung und die Datenübertragung kann z.B. mit der Software Monitor (Firma GeoNav) erfolgen. Diese unterstützt gängige am Markt verfügbare GNSS Empfänger, wie u.a. auch den von der Firma GeoNav speziell für den Überwachungseinsatz entwickelten GOCA Empfänger. Für Referenzprojekte wird auf die GOCA Internetpräsenz ([www.goca.info](http://www.goca.info)) sowie auf KÄLBER ET AL. 2000, FELDMETH ET AL. 2002 und FELDMETH ET AL. 2003 verwiesen.

- FH italienische Schweiz: MDS bzw. MMS

Das MDS (Movement Detection System), auch MMS (Movement Monitoring System) genannt, wurde an der Fachhochschule der italienischen Schweiz am Institut für Computer Integrated Manufacturing (ICIMSI) entwickelt. Das System sieht vor, dass während eines Messintervalls von ca. 20 Minuten die Trägerphasenmessungen an den mit Low-Cost GPS Empfängern bestückten Messstationen gesammelt und anschließend an die Zentralstation übermittelt werden. Bei einem Netzzumfang von beispielsweise fünf Punkten kann alle 30 - 40 Minuten eine Lösung für jede Station zur Verfügung gestellt werden. Gemäß MANETTI UND KNECHT 2000 kann diese Zeitspanne „in vielen Anwendungsbereichen als genügend kurz bewertet werden“. Bei Basislinien mit einer Länge von 2 - 3 km liegt die erreichbare Genauigkeit im Bereich von 10 - 15 mm. Nach einer Machbarkeitsstudie im Jahr 1999 folgten erste Projekte wie die Überwachung des Wellenbrechers im Hafen von Genua (vgl. DEL GROSSO ET AL. 2003 sowie MANETTI UND GLISIC 2003).

- Geo++: GNPOM

Das System GNPOM (Geodetic Navstar Permanent Object Monitoring) wurde von der Firma Geo++ entwickelt. Die Prozessierung der Trägerphasenbeobachtungen von GPS Sensoren ohne RTK-Option und ohne internen Speicher (ANDREE ET AL. 2001) erfolgt mit der Software GNNET. Es werden kalibrierte Antennen verwendet, um die aus Antennenphasenzentrumsvariationen (PCV) resultierenden Fehler minimal zu halten. Zur Reduktion des Multipatheffektes erfolgt eine Kombination von statischer oder geringdynamischer Modellierung mit der Berücksichtigung von

siderischen Tagesdifferenzen. Nach ANDREE ET AL. 2001 sind die verbleibenden Beobachtungen „frei von systematischen Fehlern, bei einer Genauigkeit besser als 1 Millimeter“. In einem mehrere Wochen andauernden Testbetrieb an der Schleuse Uelzen konnten Messdaten mit Zweifrequenz-Empfängern aufgezeichnet werden, die im Anschluss einmal unter Verwendung beider Trägerphasen ( $L_1$ ,  $L_2$ ) und zusätzlich für einen Punkt exemplarisch nur mit den  $L_1$ -Beobachtungen ausgewertet wurden. Laut WÜBBENA ET AL. 2001 sind Einfrequenz-Messungen für diese Art von Monitoring ausreichend, solange die Abstände zwischen den Antennen ein „gewisses Maß“ nicht überschreiten, das nicht näher spezifiziert wird. Obwohl bei den Untersuchungen Chokering-Antennen zum Einsatz kamen, wird die Ansicht vertreten, dass auch Einfrequenz-Empfänger in Kombination mit günstigeren Antennen ausreichend sein sollten, wenn sie kalibriert sind. Für weitere Informationen sei auf ANDREE ET AL. 2001, WÜBBENA ET AL. 2001 und die Firma Geo++ ([www.geopp.de](http://www.geopp.de)) verwiesen.

- UniBwM, Institut für Erdmessung und Navigation: DREAMS

Am Institut für Erdmessung und Navigation der UniBwM (heute Institute of Space Technology and Space Applications - ISTA) wurde das System DREAMS (Differential Realtime Deformation Monitoring System) entwickelt. Es ist als modulares und skalierbares System für verschiedene Satellitennavigationssysteme (GPS, GLONASS, Galileo) sowie für unterschiedlichste GNSS Empfänger (NovAtel, Ashtech, Javad, Topcon, ...) konzipiert und sieht diverse Übertragungsmöglichkeiten (seriell, WLAN, ...) vor. Mit Hilfe spezieller Mehrwege-Reduktionsverfahren werden Genauigkeiten im Millimeterbereich erzielt. Zur Überwachung des Systems wird ein Hardware-Watchdog eingesetzt, der im Falle einer Systemstörung für einen Neustart sorgt. Ein Scheduler bietet die Möglichkeit, das System temporär abzuschalten und wieder in Betrieb zu nehmen. In RIEDL 2010 wurde das System ausführlich auch hinsichtlich Stromversorgung, Wetterschutz etc. beschrieben und Ergebnisse einiger Tests an der UniBwM sowie an der Haseltalbrücke gezeigt.

- Universität Stuttgart, Institut für Ingenieurgeodäsie

Am Institut für Ingenieurgeodäsie an der Universität Stuttgart (IGS) wird ein GNSS Monitoring-System auf Basis von GPS Massenmarkt-Empfängern entwickelt. Bei ersten Tests wurde ein u-blox Lea 6T Empfänger in Kombination mit unterschiedlichsten Antennentypen wie u-blox ANN-MS, Vimcom 96/1 und Trimble Bullet III untersucht (vgl. ZHANG UND SCHWIEGER 2013A und ZHANG UND SCHWIEGER 2013B). Bei der Auswertung, welche bisher im Postprocessing, aber zukünftig automatisiert in Nahe Echtzeit erfolgen soll, wurden für die Kombination mit der ANN-MS Antenne

(auf einer Grundplatte montiert und nicht kalibriert) Genauigkeiten mit einer maximalen Abweichung von 2 cm zur bekannten Sollposition bei einer Länge des Auswertintervalls von 10 Minuten erreicht. Die Standardabweichung der horizontalen Koordinatenkomponenten wird unabhängig von der Beobachtungsdauer bzw. dem Auswertintervall mit  $< 4$  mm angegeben (vgl. SCHWIEGER UND ZHANG 2012). Ein besonderes Merkmal des Systems ist ein Wireless-Ad-hoc-Netz als Kommunikationsstruktur, das eine selbstorganisierende Vernetzung der einzelnen Sensorknoten ermöglicht. Anders als in Infrastrukturnetzen, in denen eine Basisstation (Access Point) die Koordination aller Clients übernimmt, sind in Ad-hoc-Netzen alle Stationen gleichwertig und verfügen i.d.R. über Routing-Fähigkeiten, so dass sie nicht nur in der Lage sind Informationen zu empfangen, sondern diese auch weiterzuleiten. Es entsteht ein Wireless Mesh Network (WMN).

- Alberding GmbH: Alberding A07 Monitoring-System

Das Alberding A07 Monitoring-System ist hier als ein Beispiel einer kommerziellen Vermarktung von Low-Cost GNSS Monitoring-Systemen aufgeführt. Der Alberding A07 besteht aus einem L<sub>1</sub> GNSS Multisystem-Empfänger (GPS, GLONASS, Galileo, SBAS), einem GPRS-Modem, Bluetooth-Modulen, Zusatzsensorik und einem integrierten Prozessor. Er kann je nach Anwendung mit unterschiedlichen externen GNSS Antennen verwendet werden und ist aufgrund der variablen Konfiguration für verschiedene Anwendungsgebiete einsetzbar. Bei Monitoring Anwendungen werden die intern gespeicherten Daten über GPRS an einen Internetserver übermittelt und von der Alberding Monitoring Software konvertiert, bewertet, in definierbaren Intervallen mit Wa1 in NRT prozessiert und anschließend visualisiert. Je nach Beobachtungsintervall können Koordinatenänderungen  $< 1$  cm nachgewiesen werden (vgl. ALBERDING 2014 und ALBERDING 2015).

## 4.7 Merkmale des GeoSN

Das System GeoSN sowie die in Abschnitt 4.6 dargestellten Low-Cost GNSS Monitoring-Systeme sind bzgl. der Merkmale Ansatz/Methodik (Netzdesign und -layout), Hardware (Art der GNSS Sensorik, Flexibilität bei deren Auswahl, Fehlerreduktion im Stationsumfeld) und Auswertemethoden (Rohdatenfilterung, Eliminierung bzw. Reduzierung systematischer Effekte, Korrekturmodelle) unterschiedlich ausgelegt. Nachfolgend sind die wichtigsten Merkmale des Systems GeoSN zusammengefasst, wie es in den beschriebenen Pilotprojekten eingesetzt worden ist.

- Permanente Aufzeichnung von L<sub>1</sub> Rohdaten (incl. Trägerphase)
- Automatische PDGNSS Auswertung in NRT
- Verwendung nicht kalibrierter Antennen
- Bisher keine Verwendung von Grundplatten
- Möglichkeit der Anpassung der Empfänger im laufenden Betrieb (2 Wege Kommunikation)
- „On the fly“ Datenübertragung mittels WLAN, auch über große Entfernungen
- Realisierung als Geo-Sensornetz
- Vollautomatischer Systembetrieb ohne jegliche Nutzerinteraktion
- Modularer Aufbau der zentralen Steuerungssoftware
- Optionale Integration externer Programmsysteme (z.B. Basislinienprozessor, Analyse- und Visualisierungstools)
- Konzipiert für autarken Permanentbetrieb auch unter widrigen Bedingungen
- Möglichkeit der Fernabfrage und -wartung des Systems (Remote Desktop Betrieb)
- „Offenes“ System, was die Einbindung weiterer Sensoren bzw. Anbindung an vorhandene Multisensornetze ermöglicht
- Datenhaltung: Datei- und Datenbankbasiert

## 5 Optimierung bei Low-Cost GNSS Monitoring-Systemen

### 5.1 Möglichkeiten für eine Optimierung

#### 5.1.1 GNSS Netzdesign

Ein optimales Netzdesign muss u.a. eine Flexibilität in Bezug auf eine räumliche Anordnung der Punkte bieten, da die Situation eintreten kann, dass auf Grund der gewonnenen Erkenntnisse, eine Ausweitung erforderlich wird. So kann sich beispielsweise bei der Überwachung eines Rutschhanges herausstellen, dass eine ursprünglich als stabil angenommene Referenzstation in einem von der Rutschung beeinflussten Gebiet liegt. Daher sind zur gegenseitigen Kontrolle ggf. weitere Referenzstationen im Netzentwurf vorzusehen.

Weiterhin ist auf günstige Beobachtungsbedingungen (u.a. geringe Abschattungen, geringer Multipatheinfluss) zu achten. Um troposphärische Fehlereinflüsse (vgl. Abschnitt 3.2.2) gering zu halten, sollte die vertikale Ausdehnung des Netzes begrenzt sein, da ansonsten Referenzstationen in den unterschiedlichen Höhenlagen vorzusehen oder die Höhenunterschiede durch geeignete Modelle bei der Auswertung zu berücksichtigen sind.

Durch Kombination von kostengünstigen Einfrequenz-Empfängern mit höherwertigen Zweifrequenz-Empfängern entsteht ein sogenanntes „hierarchisches“ Netz. Im Gegensatz zu einem „hybriden“ Netz, in dem unterschiedliche Beobachtungstechniken – beispielsweise satellitengestützt und terrestrisch – in einer Auswertung kombiniert sind, kommt in einem hierarchischen Netz die gleiche Beobachtungsmethode zum Einsatz, die sich nur in der Qualität der eingesetzten Sensoren unterscheidet. In einem hierarchischen Netz können die aus den Beobachtungsdaten von Zweifrequenz-Empfängern ableitbaren ionosphärischen und troposphärischen Korrekturen bei der Auswertung der Einfrequenz-Beobachtungsdaten herangezogen werden. Insbesondere in einem vertikal stark ausgedehnten Netz, wie es oft bei der Überwachung von Rutschhängen der Fall ist, bietet ein hierarchisches Netz ein großes Verbesserungspotential. Exemplarisch wird hier verwiesen auf die Untersuchungen von JANSSEN 2003, die zeigen, dass durch die ionosphärischen Korrekturen, welche anhand der die Einfrequenz-Empfänger umrahmenden Zweifrequenz-Empfänger bestimmt wurden, Verbesserungen der Basislinien im Mittelwert von bis zu 49% erzielt werden und auf die Untersuchungen von RIZOS ET AL. 2000, die ergaben, dass korrigierte Einfrequenz-Ergebnisse mit den Zweifrequenz-Ergebnissen, insbesondere in der Lage, vergleichbar sind.

Zwangsweise ist das Vorhalten bzw. der eigene Betrieb der evtl. mit Zweifrequenz-Empfängern ausgestatteten Referenzstationen im Rahmen eines Projektes nicht notwendig, da soweit das Monitoringkonzept bzw. die Auswertesoftware es zulässt, auch auf externe Beobachtungsdaten

zurückgegriffen werden kann. Diese können z.B. für Kontrollen der Stabilität eigener Referenzstationen nur „epochal“ für reine Postprocessing-Kontrollen genutzt werden, oder man greift auf Echtzeitdatenströme, wie sie beispielsweise von SAPOS-Stationen (Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung) erhältlich sind, zurück. Jedoch sprechen die nicht beeinflussbare räumliche Verteilung solcher Stationen in der Umgebung zum Objekt, die freie Auswahlmöglichkeit der Hardware, das Aufzeichnen der Trägerphasenmessungen entsprechend der eigenen Vorgaben sowie möglicherweise anfallende Gebühren eines Positionierungsdienstes im Regelfall für das Anlegen eigener Referenzstationen.

Basierend auf der Zielsetzung dieser Arbeit, das Potential einer Überwachung ausschließlich mit Einfrequenz-Empfängern bestückten Netzpunkten zu untersuchen, wurde die Möglichkeiten eines hierarchischen Netzdesigns nicht weiter verfolgt. In Abschnitt 5.2.1 wird das Potential von Genauigkeits- und Zuverlässigkeitssteigerungen durch Netzausgleichung in einem redundant ausgelegten Netz exemplarisch aufgezeigt.

### **5.1.2 Epochenlänge und Aufzeichnungsrate**

Die Frage nach einer optimalen Epochenlänge ist bei der Low-Cost GNSS Datenauswertung von besonderem Interesse und wurde u.a. bereits in ROBERTS ET AL. 2004, BROWN ET AL. 2006, SCHWIEGER 2009 und ZHANG ET AL. 2012 diskutiert, da sich dies unmittelbar auf die zu erwartende Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Basislinien auswirkt. Der Einfluss der Datenrate blieb jedoch bisher weitestgehend unberücksichtigt.

Beim Festlegen der Epochenlänge ist auch die zu erwartende Bewegung zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 2.3). Eine Ausweitung der Epochenlänge zur Genauigkeitssteigerung einer Basislinienlösung - beispielsweise von 900 s auf 3600 s - führt ebenso wie eine Tiefpassfilterung einzelner Epochenlösungen zu einer verzögerten Bereitstellung der Ergebnisse.

In ROBERTS ET AL. 2004 werden die Ergebnisse der Auswertung von  $L_1$  im Vergleich zu  $L_1/L_2$  Daten (NovAtel SSII, Datenrate 1 Hz und 5 Hz, Beobachtungsdauer 3 h) für verschiedene Basislinienlängen (2 m, 1,2 km, 3,8 km, 6,3 km, 11,0 km) und verschiedene Epochenlängen (600 s, 1000 s, 2000 s, 5000 s) wiedergegeben. Roberts et al. stellen fest, dass die Kombination aus einer Epochenlänge von 2000 s bei einer Datenrate von 5 s, also 400 Trägerphasenbeobachtungen, für die untersuchten Anwendungsfälle und Beobachtungsbedingungen am geeignetsten ist, da bei dieser Epochenlänge für Basislinien bis zu 6,8 km alle Mehrdeutigkeiten gelöst wurden und zwischen den Datenraten (1 s, 5 s, 30 s) kein merklicher Unterschied feststellbar war, der ein erhöhtes Datenaufkommen rechtfertigt.



In BROWN ET AL. 2006 werden sowohl  $L_1/L_2$  als auch  $L_1$  Daten (Leica GMX902, Datenrate 1 Hz, Beobachtungszeitraum 5 Tage) in verschiedenen Epochenlängen (600 s, 1800 s und 3600 s) für kurze (30 m und 3,3 km) und lange Basislinien (14 km und 20 km) bezüglich der Anzahl der Fixed Lösungen und der Genauigkeit mit GPS Spider ausgewertet und verglichen. Brown et al. kommen zu dem Schluss, dass für die kurzen Basislinien bzgl. der verschiedenen Epochenlängen keine signifikanten Unterschiede in der Anzahl der Fixed Lösungen sowie in der Genauigkeit zu erkennen sind.

In SCHWIEGER 2009 werden die Ergebnisse der Auswertung von  $L_1$  Daten (u-blox, Datenrate 1 Hz, Beobachtungszeitraum 2 h) für verschiedene Basislinien (400 m bis 7,7 km) und verschiedene Epochenlängen (300 s, 600 s, 1200 s, 1800 s und 3600 s) wiedergegeben und anhand der Standardabweichungen sowie Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit bewertet. Ergebnis ist, dass eine Epochenlänge von 300 s bzw. 600 s keine ausreichende Qualität der Basislinienlösungen liefert, da die Standardabweichungen mehrere Dezimeter betragen. Erst ab 1800 s ist keine der Standardabweichungen mehr über 2,7 cm.

ZHANG ET AL. 2012 haben die Daten von Einfrequenz-Empfängern (u-blox, Datenrate 1 Hz, Beobachtungszeitraum 1 h) in verschiedenen Epochenlängen (300 s, 600 s, 900 s, 1200 s, 1500 s und 1800 s) für drei Basislinien (255 m bis 469 m) mit der Software Wa1 ausgewertet. Anhand der Ergebnisse der Epochenlängen ab 600 s ist keine deutliche Genauigkeitssteigerung mit zunehmender Epochendauer erkennbar. Nach SCHWIEGER UND ZHANG 2012 ist bei guten Empfangsbedingungen eine Epochenlänge von 10 Minuten ausreichend für eine Ermittlung einer Basislinie.

Standardmäßig werden, wie es sich in den Pilotprojekten bewährt hat, mit dem System GeoSN die Basislinien mit einer Epochenlänge von 15 Minuten bei einer Datenrate mit 1 Hz, d.h. 900 Trägerphasenbeobachtungen, ermittelt. In Abschnitt 5.2.2 werden weitergehende Untersuchungen zur Epochenlänge dargestellt.

### **5.1.3 GNSS Sensorik**

Die Sensorik spielt in jedem geodätischen Anwendungsbereich eine zentrale Rolle, da sie einen unmittelbaren Einfluss auf die letztendlich erzielbaren Resultate hat. Aufgrund der von Projekt zu Projekt variierenden Voraussetzungen, u.a. im Hinblick auf geforderte Genauigkeiten, den Umgebungsbedingungen und den einzuhaltenden Kostenrahmen, gilt es eine optimale Auswahl aus der auf dem Markt verfügbaren Vielfalt an geeigneten Komponenten zu treffen.

Grundsätzlich sind Kombinationsmöglichkeiten aus kostengünstigen Einfrequenz- oder geodätischen Mehrfrequenz-Empfängern mit „einfachen“ Patch-Antennen oder geodätischen „High-End“ Choke-

ring-Antennen denkbar, jedoch wird ein hochwertiger Mehrfrequenz-Empfänger in Kombination mit einer hochwertigen Chokering-Antenne dem Low-Cost Aspekt keinesfalls gerecht. Durch Auswertung von wissenschaftlichen Studien erhält man bereits einen ersten Marktüberblick geeigneter Komponenten.

PINK 2007, LANZENDÖRFER 2007, TAKASU UND YASUDA 2008, ALKAN 2010 und CEDERHOLM 2010 untersuchten beispielsweise die Zuverlässigkeit und die Genauigkeit einiger Einfrequenz-Empfänger und diverser GNSS Antennen. PINK 2007 untersuchte die Genauigkeit der Kombination eines NovAtel Allstar Boards an einer Leica Chokering-Antenne im Vergleich mit Smart Antenna SS II am Testaufbau der Universität der Bundeswehr München. Die Daten einer Woche ergaben empirische Standardabweichungen im Bereich einiger Millimeter. Des Weiteren konnte er zeigen, dass eine Soll-Bewegung detektierbar war.

LANZENDÖRFER 2007 hat den Einfrequenz-Empfänger Lea-4T von u-blox in das Monitoring-System CODMS am Rutschhang Gradenbach im Nationalpark Hohe Tauern integriert. An zwei Stationen wurden an eine Ashtech Chokering-Antenne über einen Antennensplitter zusätzlich zum Zweifrequenz-Empfänger von Ashtech der Einfrequenz-Empfänger u-blox Lea-4T installiert. Die Auswertung der Daten von ca. 65,5 h einer Netzlösung mit zwei geodätischen Zweifrequenz-Empfängern (teilweise nur  $L_1$  benutzt) zeigt, dass die Ergebnisse der Einfrequenz-Empfänger Lea 4T mit einer Chokering-Antenne mit denen geodätischer Einfrequenz-Empfänger vergleichbar sind.

TAKASU UND YASUDA 2008 untersuchen mehrere Einfrequenz-Empfänger (z.B. von u-blox, NovAtel sowie Hemisphere) und Antennen (z. B. von u-blox, Trimble sowie Pioneer) im Vergleich zu dem Zweifrequenz-Empfänger (NovAtel OEMV3) und der hochwertigeren Antenne NovAtel GPS-702-GG. Sie stellten fest, dass es große Unterschiede zwischen den Antennen, aber nur geringe Unterschiede zwischen den Empfängern gibt. Hierbei ist nur zu berücksichtigen, dass die Lösung der Mehrdeutigkeiten bei den Einfrequenz-Empfängern mehr Zeit benötigt.

In CEDERHOLM 2010 sind die Ergebnisse von Zero-Baseline-Tests für verschiedene Einfrequenz-Empfänger (Garmin 12XL, Magellan AC12, u-blox Antaris TIM-LP sowie u-blox Antaris Lea 4T) dargestellt. Die getesteten Empfänger wurden gleichzeitig jeweils paarweise über Antennensplitter an zwei Low-Cost Antennen angeschlossen und deren Rohdaten für 30 Minuten mit einer Datenrate von 1 Sekunde aufgezeichnet. Bei der Auswertung der Doppeldifferenzen ergaben sich Standardabweichungen im Millimeterbereich, wobei der Garmin 12XL, dessen Rohdaten sich nur mit der bereits erwähnten Software (vgl. Abschnitt 4.2) abgreifen lassen, am schlechtesten abschneidet.

In ALKAN 2010 werden Untersuchungen mit dem Garmin GPS25-HVS und dem Magellan Professional AC12 im Vergleich zum geodätischen Zweifrequenz-Empfänger Ashtech Z-Xtreme gezeigt. Die Empfängerboards wurden in Kombination mit dem Ashtech Z-Xtreme nacheinander

jeweils über einen Antennensplitter an eine Ashtech Antenne (Einfrequenz- bzw. Zweifrequenz-) angeschlossen und die Daten in 30, 60 und 120 Minuten Intervallen aufgezeichnet. Während die Positionsgenauigkeit bei den Garmin Daten nur ab einer Beobachtungsdauer von 60 Minuten und auch nur für die kürzere 6 km Basislinie im Zentimeterbereich lagen, konnten mit dem Magellan Professional AC12 sowohl bei den längeren Basislinien (bis zu 51 km) als auch bei kürzeren Epochenlängen Zentimetergenauigkeit erreicht werden.

In Abschnitt 5.2.3 werden weitergehende Untersuchungen zur GNSS Sensorik unter Verwendung von Einfrequenz-Empfängern dargestellt.

#### **5.1.4 GNSS Auswertung**

##### Multi-GNSS Auswertung

Eine Multi-GNSS Auswertung, bei der Beobachtungen von allen verfügbaren Satellitensystemen berücksichtigt werden, kann aufgrund einer erhöhten Verfügbarkeit von Signalen, den daraus resultierenden Kombinationsmöglichkeiten (Frequenzen und Systeme) und der Möglichkeit zur Kontrolle durch Vergleich verschiedener Lösungen, die Genauigkeit, die Verfügbarkeit und die Zuverlässigkeit von Epochenlösungen steigern. Dies spielt insbesondere in von starken Abschattungen gekennzeichneten Gebieten eine Rolle, wie dies z.B. bei den Projekten Hornbergl und Sudelfeld auf einzelnen Punkten der Fall ist. FLOTH UND KORTH 2007 untersuchen die gemeinsame Nutzung von GPS und GLONASS bezüglich der genannten Kriterien, stellen jedoch fest, dass lediglich die Steigerung der Satellitenanzahl sich nicht unmittelbar auf die Genauigkeit auswirkt, in Punkto Zuverlässigkeit kann zeitweise eine Verbesserung festgestellt werden. Abschnitt 5.2 befasst sich mit Untersuchungen verschiedener GNSS Auswertesoftware im Hinblick auf deren Resultate bei der Multi-GNSS Auswertung. Nachdem sich zum Zeitpunkt der Untersuchungen nur das GPS und das GLONASS System im operablen Betrieb befanden, beschränken sich die Untersuchungen auf diese beiden GNSS Systeme. Mit Aufnahme eines operablen Betriebs des Galileo Systems am 16.12.2016 (Galileo Initial Service) haben sich für die Multi-GNSS Nutzung und Auswertung neue interessante Möglichkeiten und Untersuchungsansätze ergeben.

## Bearbeitung der Beobachtungsgrößen – Gewichten oder Eliminieren von Trägerphasendaten

Durch eine entsprechende Gewichtung von Trägerphasenbeobachtungen können Genauigkeitssteigerungen erreicht werden. Eine elevationsabhängige Gewichtung berücksichtigt, dass das Messrauschen mit abnehmender Elevation steigt, da das GNSS Signal einen längeren Weg durch die Atmosphäre nimmt. Aufgrund der Tatsache, dass Multipath und Beugung (vgl. Abschnitt 3.2.3) umgebungsabhängig sind, ist eine reine elevationsabhängige Gewichtung nicht sinnvoll; vielmehr ist die Signalqualität für die Gewichtung heranzuziehen. Diese wird entweder als Signal to Noise Ratio (SNR) in der Einheit dB oder wie es beim GPS L1 C/A Signal üblich ist, als Verhältnis Carrier Power to Noise Power per bandwidth unit ( $C/N_0$ ) in dB-Hz angegeben. Unterschiedliche Definitionen bzw. die verschiedenen Formen der Signalqualität sind bei den verschiedenen Empfängern zu beachten und erschweren den Umgang mit diesen Werten. Für die verschiedenen Gewichtsmodelle wie z.B. Sigma- $\epsilon$  (Signalqualität), Sigma- $\Delta$  (Veränderung der Signalqualität) und Sigma-F Modell (Parameterschätzung) sowie deren Eignungsnachweis sei auf HARTINGER ET AL. 1999, BRUNNER ET AL. 1999 und WIESER 2002 verwiesen. Limitationen der einzelnen Gewichtsmodelle sind in ROST 2011 zusammengefasst. Da ein derartiger Eingriff in die Software nicht realisierbar war (meist kann nur in Abhängigkeit der Elevation oder der Signalstärke gewichtet werden), wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter darauf eingegangen.

Eine gezielte Eliminierung von problematischen Beobachtungsdaten kann ebenfalls zu Genauigkeitssteigerung führen. Hierfür kann bei der Basislinienauswertung angegeben werden, welche Satelliten auszuschließen sind bzw. ab welcher Elevation oder welcher Signalqualität die Satelliten zu eliminieren sind. Erfolgt die Prozessierung im Permanentbetrieb ohne Nutzereingabe, so muss die Auswahl der auszuschließenden Satelliten automatisiert erfolgen. Auch wenn eine strikte Auswahl allein mittels eines definierten Schwellwertes für Signalqualität und Elevation naheliegend ist, so erscheint dies nicht zweckdienlich. Wenn die Umgebungsbedingungen lediglich eine geringe Anzahl an Satelliten bedeuten, z.B. Pilotprojekt Hornbergl (vgl. Abschnitt 4.4.2), kann es sinnvoll sein, eine präzisere Auswahl durchzuführen. Eine Abwägung zwischen „weniger“ Satelliten oder Satelliten, die ungünstigere Elevations- oder Signalqualitätswerte aufweisen, ist zu treffen. Darüber hinaus kann es auch sinnvoll sein, einen Satelliten nicht vollständig aus einer Epoche zu entfernen, wenn dieser zum Beispiel nur über ein kurzes Zeitfenster eine schlechte Signalqualität aufweist. Vielmehr wäre anzustreben, dass dieser dann nur für den Zeitraum der ungünstigen Signalqualitätswerte ausgeschlossen wird. Ebenso ist es von Vorteil, anstatt eines starren Elevations-Grenzwertes, der sich an der maximal auftretenden Abschattung orientieren sollte, woraus eine unnötige Einschränkung

bzw. Reduzierung der für die Auswertung nutzbaren Beobachtungen resultieren würde, in Abhängigkeit der Örtlichkeiten eine azimutabhängige Grenzelevation zu definieren.

ZHANG UND SCHWIEGER 2013B untersuchen, inwieweit sich unterschiedliche minimale Elevationswinkel der zur Auswertung herangezogenen Beobachtungen auswirken. Eine generelle Erhöhung des Elevationswinkels auf beispielsweise  $15^\circ$  ergibt ein sehr unterschiedliches Bild, da bei einigen Stationen keine Unterschiede, bei anderen Verbesserungen und bei wiederum anderen Verschlechterungen auftreten. Eine gezielte Elimination von Satelliten resultierend aus den Abschattungsmasken bzw. Satellitenverfügbarkeitsdiagramm hat die Genauigkeit nur unwesentlich verbessert und wurde aufgrund der manuellen und iterativen Durchführung als zu aufwendig und somit für Nahe Echtzeit Auswertungen als ungeeignet angesehen. KLOSTIUS ET AL. 2006 vergleichen verschiedene Gewichtungs- sowie unterschiedliche Eliminierungsmodelle und zeigen, dass Beugungseffekte sowohl durch eine azimutabhängige Grenzelevation sowie durch eine Gewichtung aufgrund der Signalqualitätswerte eliminierbar sind.

In Abschnitt 5.2.5 werden Untersuchungen vorgestellt, bei denen in einer automatisierten und der Basislinienprozessierung vorgeschalteten Datenanalyse Beobachtungsdaten aufgrund der Kriterien Elevation, Azimut (azimutabhängige Grenzelevation) und Signalqualität extrahiert werden.

## **5.2 Untersuchungen zur Optimierung**

### **5.2.1 GNSS Netzdesign**

In einer überbestimmten Konfiguration kann eine Netzausgleichung erfolgen (vgl. Abschnitt 3.5.2). Aus diesem Grund wurde das Modul „Netzausgleichung“, das auf dem Freeware Programm XDesy (KERN 2008) basiert, in den Datenfluss des GeoSN integriert. In Near Realtime steht dadurch eine ausgeglichene Epochenlösung des Netzes zur Verfügung.

Die vom Basislinienprozessor (z.B. GrafNav oder Wa1) berechneten Basislinien mit den zugehörigen Standardabweichungen sowie Korrelationskoeffizienten werden automatisiert aus der Datenbank (Tabelle gns\_rawdata, vgl. Abschnitt 4.3 und Anhang A 5) für einen solchen Auswerteschritt übernommen. Dabei kann vorab im Zuge der Konfiguration des GeoSN ausgewählt werden, ob eine Ausgleichung im WGS84-System oder aber z.B. bei der Hinzunahme von Tachymeterdaten in Gebrauchskordinaten (incl. der benötigten Transformation) erfolgen soll. Erforderliche Informationen wie beispielsweise der Point\_type (Referenz oder Rover, aus Tabelle gns\_station),

die Näherungskordinaten oder eine eventuell gewünschte Gewichtung der einzelnen Basislinienkomponenten werden ebenfalls automatisiert aus der Datenbank gelesen.

Das Ergebnis der Ausgleichung, die geschätzten Koordinaten der Objektpunkte incl. Genauigkeitsangaben, wird der von XDesy erstellten Ergebnisdatei entnommen und zurück in die Datenbank (Tabelle gnss\_results) geschrieben. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Kofaktoren der Unbekannten nicht in der Standardausgabedatei, sondern nur mittels des Debug Modus (vgl. KERN 2009) ausgegeben werden.

Das Modul „Netzausgleichung“ ist auch nachgeschaltet im Postprocessing anzuwählen. Hierfür muss in der Datenbank der Status der gewünschten Epochen, die über die sogenannten epoch\_id (Tabelle gnss\_epochs) – definiert durch GPS Woche und GPS Sekunde – auf „to graduate“ geändert werden. Anschließend wird der Postprocessing-Modus für die Ausgleichung gestartet.

Für einen exemplarischen Datensatz eines vierwöchigen Zeitraumes (GPS Woche 1631-1634) aus dem Pilotprojekt „Schiffshebewerk Scharnebeck“ (vgl. Abschnitt 4.4.4) wurde eine vermittelnde Ausgleichung (vgl. Abschnitt 3.5.2) mit den Sensorknoten #1000 und #2000 als Referenzstationen sowie #101 - #104 als Objektpunkte durchgeführt. Im Anhang A 6 sind exemplarisch die Zeitreihen der ausgeglichenen Epochenlösungen für den Rechtswert des Objektpunktes #101 für die GPS sowohl als auch für die GPS & GLONASS Auswertung dargestellt. Die Zeitreihen der ausgeglichenen Epochenlösungen enthalten im Vergleich zu den ursprünglichen Epochenlösungen der Basislinien 1000–101 sowie 2000–101 signifikant weniger Ausreißer. Ein vergleichbares Resultat wäre mit entsprechender Ausreißereliminierung nach dem Bilden gleitender Mittelwerte erst zeitverzögert (vgl. Abschnitt 3.5.1) erreichbar. Eine Ausgleichung liefert demnach zeitnaher eine zuverlässige Aussage, ob es sich bei einer Koordinatenveränderung tatsächlich um eine Bewegung handelt oder nicht.

Die ausgeglichenen Koordinaten der Objektpunkte mit den dazugehörigen Standardabweichungen, sowie die sich in ursprünglichen Prozessierungen (Basislinie 1000 - x und 2000 - x) ergebenden Werte sind für eine reine GPS Auswertung in Tabelle 18 und für die GPS & GLONASS Auswertung in Tabelle 19 dargestellt.

**Tabelle 18: GK Koordinaten der Objektpunkte der einzelnen Berechnungen (GPS)**

Objektpkt	R [m]	H [m]	Höhe [m]	s <sub>R</sub> [m]	s <sub>H</sub> [m]	s <sub>Höhe</sub> [m]	Berechnung
101	3599287,311	5907678,427	93,383	0,011	0,007	0,013	1000-101
	3599287,313	5907678,428	93,382	0,014	0,010	0,015	2000-101
	3599287,312	5907678,428	93,383	0,004	0,005	0,009	AGL
102	3599311,877	5907703,295	93,402	0,008	0,007	0,011	1000-102
	3599311,878	5907703,297	93,401	0,010	0,009	0,013	2000-102
	3599311,878	5907703,297	93,402	0,003	0,006	0,009	AGL
103	3599338,749	5907674,884	93,384	0,009	0,008	0,012	1000-103
	3599338,751	5907674,886	93,383	0,010	0,011	0,014	2000-103
	3599338,750	5907674,886	93,384	0,004	0,005	0,010	AGL
104	3599293,227	5907764,081	93,398	0,010	0,006	0,007	1000-104
	3599293,228	5907764,083	93,397	0,010	0,008	0,015	2000-104
	3599293,228	5907764,083	93,398	0,003	0,005	0,007	AGL

**Tabelle 19: GK Koordinaten der Objektpunkte der einzelnen Berechnungen (GPS & GLONASS)**

Objektpkt	R [m]	H [m]	Höhe [m]	s <sub>R</sub> [m]	s <sub>H</sub> [m]	s <sub>Höhe</sub> [m]	Berechnung
101	3599287,312	5907678,426	93,381	0,006	0,004	0,008	1000-101
	3599287,314	5907678,428	93,381	0,005	0,005	0,010	2000-101
	3599287,313	5907678,428	93,381	0,003	0,003	0,007	AGL
102	3599311,878	5907703,295	93,401	0,005	0,004	0,008	1000-102
	3599311,879	5907703,296	93,401	0,005	0,005	0,009	2000-102
	3599311,879	5907703,297	93,402	0,003	0,004	0,007	AGL
103	3599338,750	5907674,884	93,383	0,006	0,005	0,009	1000-103
	3599338,751	5907674,885	93,383	0,008	0,006	0,012	2000-103
	3599338,751	5907674,886	93,384	0,003	0,004	0,008	AGL
104	3599293,227	5907764,082	93,398	0,006	0,003	0,006	1000-104
	3599293,229	5907764,083	93,397	0,004	0,004	0,009	2000-104
	3599293,228	5907764,084	93,398	0,003	0,003	0,006	AGL

Wie in Tabelle 18 und Tabelle 19 ersichtlich ist, zeigt sich der durch eine Ausgleichung der Basislinien erreichbare Gewinn in deutlich geringeren Standardabweichungen im Vergleich zu den Standardabweichungen der ursprünglichen unabhängigen Einzelauswertungen. Während die Standardabweichungen bei der GPS Auswertung um bis zu 10 mm geringer sind, so beträgt die Differenz bei der GPS & GLONASS Auswertung nur ca. 3 mm. Ferner ist die erwartete Genauigkeitssteigerung durch die gemeinsame Verwendung von GPS und GLONASS ersichtlich.

### 5.2.2 Epochenlänge

Anhand einer repräsentativen Datenmenge aus den in Abschnitt 4.4 vorgestellten Pilotprojekten kann der Einfluss der Epochenlänge auf die Ergebnisse unter unterschiedlichen Bedingungen empirisch betrachtet werden. Folgende Daten wurden hierzu mit verschiedenen Epochenlängen (900 s, 1800 s, 3600 s, 10800 s, 21600 s, 43200 s und 86400 s) mit Wa1 prozessiert, wobei die Datenrate stets mit 1 Hz festgelegt ist:

- Hornbergl (GPS Woche 1651-1655 – ungünstige Abschattungsbedingungen, GPS)
- Sudelfeld (GPS Woche 1538-1542 – mittelmäßige Abschattungsbedingungen, GPS)
- Scharnebeck (GPS Woche 1635-1639 – sehr gute Abschattungsbedingungen, GPS & GLONASS)

Ausgehend von der Startepoche (z.B. Hornbergl GPS Woche 1651, GPS Sekunde 0) wurden die 15 Minuten Rohdatendateien den Epochenlängen entsprechend „verknüpft“ und mittels Wa1 prozessiert. Die Ergebnisse werden in der Datenbank gespeichert, eine Transformation ins GK System durchgeführt und abschließend erfolgt ein Vergleich der Mittelwerte und der Standardabweichungen für die einzelnen Szenarien. Entsprechend der Qualitätsangabe von Wa1 (solution quality) wurden „alle“ (auch Float Lösungen), „nur fixed“ und „nur high“ Lösungen beachtet. Die Ergebnisse sind im Anhang A 7, Anhang A 8 und Anhang A 9 dargestellt.

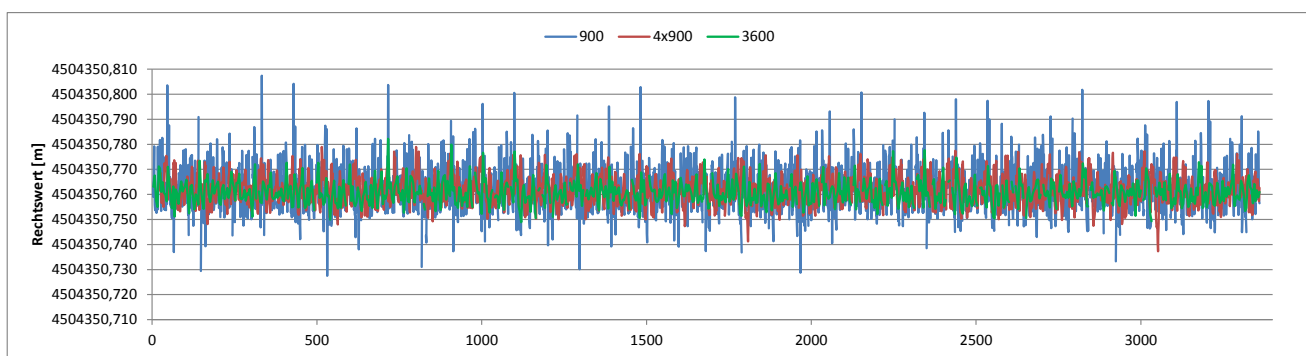
Es ist festzustellen:

- Die Epochenlänge hat beim Projekt Scharnebeck keinen Einfluss auf die Bestimmung der Koordinaten. Diese ändern sich lediglich bei „alle“ um maximal 1 mm, bei „nur fixed“ und „nur high“ Lösungen sind keine Änderungen ersichtlich. Bei dem Projekt Sudelfeld unterscheiden sich die Koordinaten je nach Epochenlänge bei „alle“ um zu bis 10 mm bei „nur fixed“ und „nur high“ um bis zu 3 mm. Beim Projekt Hornbergl hingegen unterscheiden sich die Koordinaten je nach Epochenlänge um bis zu 31 mm bei „alle“ und bei „nur fixed“ und „nur high“ insbesondere bei der Höhe um bis zu 11 mm.
- Die Standardabweichungen sind i.d.R. bei den drei Projekten entsprechend der Erwartung geringer, je größer die Epochendauer ist (insbesondere bei „alle“ Lösungen), wobei sich die Verbesserung mit der Epochendauer abschwächt. Eine Ausnahme ist die Basislinie 21 vom Projekt Hornbergl, bei der sowohl bei den „nur fixed“ als auch bei den „nur high“ Lösungen die Standardabweichung des Rechtswertes bei der Epochenlänge von 1800 s größer als bei der Epochenlänge 900 s ist (vgl. Anhang A 7). Die Größenordnungen der Standardabweichungen von „nur fixed“ und „nur high“ sind vergleichbar, die von „alle“ erst mit zunehmender Epochenlänge ab ca. 1800 s beim Projekt Scharnebeck bis zu 10800 s beim Projekt Hornbergl.
- Die Anzahl der Lösungen (in %) steigt i.d.R. mit zunehmender Epochendauer, wobei es Ausnahmen gibt. Beim Projekt Scharnebeck (sehr gute Abschattungsbedingungen) werden i.d.R. bei 1800 s, spätestens jedoch bei 3600 s, die 100 % erreicht. Bei dem Projekt Sudelfeld werden die 100 % bei der Basislinie 12 gar nicht und bei den anderen Basislinien erst teilweise erst ab 21600 s erreicht. Das Minimum liegt bei 75,71 % (Basislinie 11, „nur high“, 3600 s). Beim Projekt Hornbergl ist die Verfügbarkeit noch geringer, „nur high“ erreicht gar nicht die 100 %, das Minimum liegt bei 41,90% (Basislinie 21, „nur high“, 3600 s).



- Bei dem Projekt Scharnebeck gibt es ab einer Epochendauer von 1800 s (Basislinien ID 11, 12 und 13) bzw. 3600 s (Basislinie ID 14) keine Unterschiede mehr zwischen „alle“, „nur fixed“ und „nur high“. Beim Sudelfeld ab 10800 s (Basislinien ID 12 und 13) bzw. 21600 s (Basislinien ID 11), beim Hornbergl gar nicht.

Um zu beurteilen, ob eine größere Epochenlänge das gleiche Ergebnis liefert wie eine gleitende Mittelbildung mehrerer kürzerer Epochen (z.B. Vergleich 3600 mit 4 x 900), wurden die Beispieldaten vom Pilotprojekt Sudelfeld entsprechend ausgewertet. In Abbildung 37 sind die Zeitreihen des Rechtswertes vom Punkt #11 und in Tabelle 20 die Standardabweichungen dargestellt.



**Abbildung 37: Vergleich der Lösungen (Rechtswerte #11 Pilotprojekt Sudelfeld) 900, 4 x 900 und 3600**

Es ist ersichtlich, dass die Zeitreihe mit einer Epochenlänge von 3600 s eine geringere Streuung (Standardabweichung) als die Zeitreihen „900“ und „4x900“ aufweist.

**Tabelle 20: Standardabweichungen der einzelnen Berechnungen**

Art der Berechnung	Standardabweichung		
	$s_R$ [m]	$s_H$ [m]	$s_h$ [m]
900	0,0087	0,0169	0,0279
3600	0,0046	0,0059	0,0121
4*900 arith	0,0065	0,0116	0,0208
4*900 Median	0,0067	0,0110	0,0206

Zusammenfassend ist zu sagen, dass keine allgemeingültige Empfehlung über die Länge der Epoche abgegeben werden kann, sondern diese von den Bedingungen wie Basislinienlänge, Höhenunterschied und Abschattungsbedingungen abhängig ist. Bei Projekten mit Voraussetzungen wie in Scharnebeck sind 900 s ausreichend, bei Projekten wie am Sudelfeld oder am Hornbergl sollte abgewägt werden, ob nicht eine längere Epochendauer gewählt werden sollte. Es kann sinnvoll sein, eine Kombination von einer kurzen Epochendauer für schnelle unverzügliche Aussagen mit einer

längeren Epochendauer für zuverlässigere Trendaussagen zu betrachten. Eine automatische und flexibel gestaltbare bzw. sich automatisch anpassende Epochenlänge im laufenden Systembetrieb – z.B. wenn für eine Epoche keine Fixed Lösung in der NRTP-Auswertung erreicht werden konnte – ist darüber hinaus denkbar.

### 5.2.3 GNSS Sensorik

Bei Low-Cost GNSS Monitoring-Systemen können entweder GNSS Empfänger in Verbindung mit separaten GNSS Antennen oder sogenannte Enclosures (Kombination aus Antenne und Empfänger) verwendet werden. Neben den bereits in Abschnitt 4.1.1 vorgestellten Enclosures (NovAtel Smart Antenna SSII und NovAtel Smart Antenna V1G) wurden zusätzlich u.a. die GNSS Empfänger Lea 4T und Lea 6T (u-blox), Flexpak V1G und Flexpak Star (NovAtel) in das System integriert und im Rahmen einer Teststudie untersucht. Als GNSS Antennen kamen die 3G+C (NavXperience), die 701 GG (NovAtel) sowie die ANN-MS (u-blox) zum Einsatz. Ein Vorteil der nicht gekapselten Systeme gegenüber den Enclosures ist, dass die Empfänger geschützt verbaut werden können und somit nicht permanent den äußeren Einflüssen unmittelbar ausgesetzt sind (vgl. Abschnitt 2.4).

Für jeden unbekanntem bzw. neuen Empfängertyp ist im GeoSN die Datenerfassung sowie die Auswertung der Daten neu zu programmieren, da jeder Empfängertyp bzw. Hersteller andere Befehle und Nachrichtenformate nutzt. Siehe hierzu die Tabelle 10 und 11 sowie den Anhang A 1 - A 4.

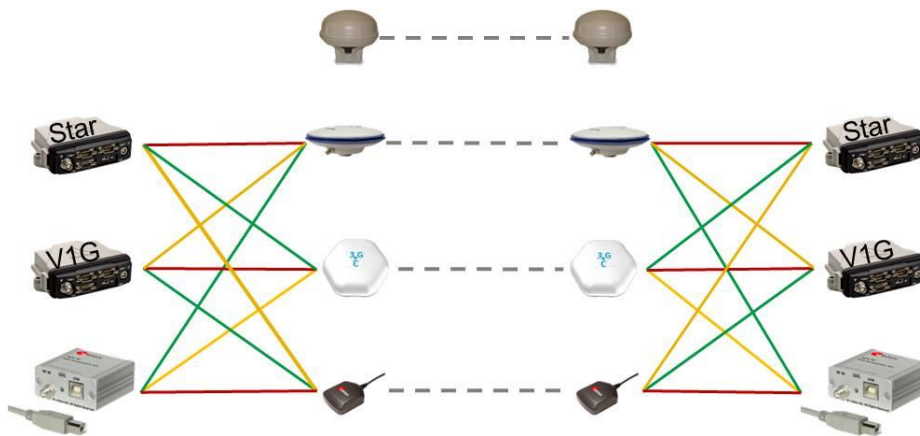
Einige der untersuchten GNSS Empfänger bieten die Möglichkeit, GLONASS Daten auszuwerten. Dies führt zu einer höheren Anzahl der verfügbaren Satelliten, was speziell bei schwierigen Umgebungsbedingungen von Vorteil ist. Sind die Umgebungsbedingungen jedoch so gut, dass stets eine relative hohe Anzahl an GPS Satelliten (z.B. > 6) sichtbar sind, lässt die Hinzunahme von GLONASS nur eine geringe Verbesserung erwarten.

Untersucht wurden neben der NovAtel Smart Antenna V1G alle Empfänger-Antennen-Kombinationen, die sich aus den Antennen 3G+C (NavXperience), 701 GG (NovAtel) und ANN-MS (u-blox) und den L<sub>1</sub>-Empfängern OEM V1G (NovAtel), OEM Star (NovAtel) und Lea 6T (u-blox) ergeben. Der Versuchsaufbau für die Antennen wurde auf dem Campus in Neubiberg realisiert. Die Anordnung der Messpunkte blieb während des gesamten Beobachtungszeitraumes unverändert.

- Start: 09.08.2011 09:30 Uhr GPS Woche 1648 GPS Sekunde 207000
- Ende: 08.09.2011 19:00 Uhr GPS Woche 1652 GPS Sekunde 414000
- Dauer: ca. 31 Tage

- Kombination 1 (rot): 1648 207000 – 1649 264600
- Kombination 2 (gelb): 1649 305100 – 1651 13500
- Kombination 3 (grün): 1651 211500 – 1652 414000
- Basislinienlänge: ca. 200 m

An den Antennen wurden nacheinander alle zu untersuchenden Empfänger, jeweils für die Dauer von ca. einer Woche, angeschlossen und deren Rohdaten mit 1 Hz aufgezeichnet (vgl. Abbildung 38). Die sich aus gleichen Antennen-Empfänger-Kombinationen ergebenden Basislinien werden u.a. mit der Software Wa1 ausgewertet (15 Minuten Postprocessing, statisch, DGPS Lösung). Zusätzlich wurde über den gesamten Zeitraum die Basislinie zwischen zwei NovAtel Smart Antenna V1G beobachtet, um Aussagen über die Vergleichbarkeit der drei Zeiträume machen zu können.



**Abbildung 38: Getestete Empfänger-Antennen-Kombinationen**

Da die Antennenpositionen unverändert geblieben sind, wurden aus allen 15 Minuten Lösungen die Mittelwerte der jeweiligen Antennenposition und die dazugehörigen Standardabweichungen berechnet (vgl. Anhang A 10). Anschließend erfolgte eine Ausreißereliminierung. Die im Anschluss resultierenden Mittelwerte und Standardabweichungen sowie die Differenzen zu den nicht bereinigten Ergebnissen sind ebenfalls im Anhang A 10 dargestellt. Die Tabelle 21 zeigt einen Auszug daraus.

**Tabelle 21: Basislinienergebnisse nach Ausreißereliminierung (GPS)**

	#	Standardabweichung			Ausreißer		
		s <sub>R</sub> [m]	s <sub>H</sub> [m]	s <sub>Höhe</sub> [m]	#	%	
SA V1G	658	0,0034	0,0046	0,0083	0	0	
	937	0,0035	0,0043	0,0084	0	0	
	370	0,0034	0,0046	0,0088	0	0	
3G+C	V1G	660	0,0021	0,0040	0,0067	0	0
	Star	368	0,0021	0,0041	0,0063	0	0
	Lea6T	804	0,0023	0,0040	0,0070	25	3,0
Nov	V1G	937	0,0020	0,0027	0,0042	0	0
	Star	660	0,0022	0,0028	0,0045	0	0
	Lea6T	383	0,0020	0,0026	0,0041	0	0
ANN-MS	V1G	369	0,0055	0,0073	0,0135	0	0
	Star	852	0,0065	0,0081	0,0136	0	0
	Lea6T	38	0,0059	0,0068	0,0102	0	0

Es ist festzustellen:

- Die Standardabweichungen der NovAtel Smart Antenna V1G (Vergleichskombination) sind für alle drei Zeiträume und somit für den gesamten Versuchsaufbau sehr ähnlich und mit denen aus den in den Abschnitten 4.4 beschriebenen Pilotprojekten vergleichbar.
- Ausreißer konnten nur bei der Kombination aus 3G+C Antenne und Lea 6T Empfänger lokalisiert und entsprechend eliminiert werden. Von den 25 identifizierten Ausreißern, die eine Größe von bis zu 19,5 m annehmen, sind 18 bzw. 20 aufeinanderfolgend (vgl. Anhang A 11). Eine mögliche Ursache für diese zeitweise Störung ist nicht bekannt.
- Mit der 3G+C Antenne werden in allen Kombinationen geringfügig bessere Ergebnisse (insbesondere im Rechtswert und in der Höhe fallen die Standardabweichungen kleiner aus) als mit der SA V1G erzielt. Die Standardabweichungen der drei Empfänger sind sehr ähnlich.
- Mit der 701 GG (NovAtel) werden mit allen drei Empfängern die besten Ergebnisse (geringste Standardabweichungen) erzielt. Die Standardabweichungen des Rechtswertes sind mit den von der 3G+C vergleichbar, aber die Standardabweichung des Hochwertes sind nochmals geringer als bei der 3G+C und die Standardabweichungen der Höhe sind gegenüber der SA V1G sogar halbiert. Auch hier sind die Standardabweichungen der drei Empfänger ähnlich.
- Mit der GPS Antenne ANN-MS werden die schlechtesten Ergebnisse erzielt. Bei der Kombination ANN-MS mit Lea 6T liegen nur 38 Epochen vor, weshalb es schwierig ist, dies zu vergleichen.
- Die Koordinaten der Antennenpositionen unterscheiden sich bei den verschiedenen Empfängern im Millimeterbereich (siehe Anhang A 10). Die größte Differenz tritt bei der 3G+C Antenne auf.

Hier unterscheidet sich die ermittelte Höhe zwischen dem Lea 6T und der NovAtel OEM V1G um 2,2 mm, allerdings handelt es sich dabei um die Kombination mit der zeitweisen Störung.

Aufgrund der GLONASS Funktionalität der SA V1G sowie des Empfängers OEM V1G wurden die gleichen Basislinien anschließend nochmal mit GPS & GLONASS ausgewertet. Diese Ergebnisse sind im Anhang A 12 dargestellt und Tabelle 22 zeigt einen Ausschnitt.

**Tabelle 22: Basislinienergebnisse nach Ausreißereliminierung (GPS & GLONASS)**

	#	Standardabweichung			Ausreißer		
		s <sub>R</sub> [m]	s <sub>H</sub> [m]	s <sub>Höhe</sub> [m]	#	%	
SA V1G	657	0,0029	0,0037	0,0074	1	0	
	935	0,0031	0,0034	0,0076	1	0	
	370	0,0031	0,0039	0,0077	0	0	
3G+C	V1G	660	0,0016	0,0023	0,0045	0	0
	Star	368	0,0021	0,0041	0,0063	0	0
	Lea6T	804	0,0023	0,0040	0,0070	25	3,0
Nov	V1G	937	0,0016	0,0020	0,0034	0	0
	Star	660	0,0022	0,0028	0,0045	0	0
	Lea6T	383	0,0020	0,0026	0,0041	0	0
ANN-MS	V1G	367	0,0048	0,0063	0,0114	2	0,5
	Star	852	0,0065	0,0081	0,0136	0	0
	Lea6T	38	0,0059	0,0068	0,0102	0	0

Es ist festzustellen:

- Im Gegensatz zu der GPS Auswertung treten hier bei der SA V1G sowie bei der Kombination ANN-MS mit V1G Ausreißer auf.
- Eine Auswertung mit GPS & GLONASS erzielt geringfügig bessere Ergebnisse.
- ANN-MS scheint entgegen der offiziellen Spezifikation über GLONASS Funktionalität zu verfügen.
- Das Ergebnis der Antenne 3G+C ist vergleichbar mit der Antenne von NovAtel.

#### 5.2.4 GNSS Auswertung

Ein Vergleich gängiger Software zur GNSS Datenauswertung soll zeigen, ob ein Einfluss auf die Ergebnisse besteht. Dabei werden auch die Benutzerfreundlichkeit, die Vielfalt der Einstell- und Ausgabeparameter, die unterstützten Empfänger, die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse sowie der Umgang mit Datensätzen unterschiedlichster Beobachtungsbedingungen verglichen. Für die

Anwendbarkeit in Monitoring-Systemen ist es unerlässlich, dass die Programme automatisiert ohne Benutzereingaben laufen können. Ferner sollten sie den in Abschnitt 3.4 genannten Anforderungen entsprechen. Benutzt wurden die GNSS Auswertesoftware

- GrafNav (NovAtel), als eine kommerzielle Software,
- RTKLIB (Takasu), als Open Source Software und
- Wa1 (Wasoft) als Vertreter einer Softwareentwicklung aus dem Hochschulbereich.

- GrafNav (Version 7.8):

Das Programm Waypoint – GrafNav der Firma NovAtel ist eine „GNSS Auswertesoftware zur leistungsfähigen Bestimmung kinematischer Trajektorien und zur statischen Netzauswertung mit Unterstützung der meisten GPS Empfänger“ (NOVATEL 2006C). Es ist durch einen Hardware-Dongle geschützt und kann batchbasiert ausgeführt werden. Die Benutzeroberfläche UI (User Interface) ist übersichtlich, sehr intuitiv in Kombination mit der optional zur Verfügung stehenden Hilfe gestaltet und kann damit als benutzerfreundlich angesehen werden. Die Software wurde in der Version 7.8 untersucht. Das Softwarepaket beinhaltet auch einen Datenkonverter (Wconvert), der bis zu 28 verschiedene (binäre) Rohdatenformate verschiedener Empfängertypen und Hersteller, wie z.B. NovAtel, Leica, Trimble, u-blox etc., in das von GrafNav benötigte Format (gpb- und epp-Datei) oder aber auch das RINEX-Format umwandelt. Nach Abschluss der Basislinienprozessierung wird das Ergebnis in eine ASCII basierte Text-Datei geschrieben. Inhalt und Format dieser Ausgabedatei sind frei wählbar und können mit Hilfe des Export-Wizard festgelegt werden. Mithilfe von Zwischenlösungen d.h. Positionen der (Einzel-)Epochen incl. der dazugehörigen Genauigkeitsangaben, kann die Entstehung der Epochenlösung nachvollzogen werden.

- RTKLIB (Version 2.4.0):

RTKLIB wurde in der Version 2.4.0 untersucht. Es ist ein Programm, welches sowohl eine RTK als auch eine Postprocessing Auswertung von statischen oder kinematischen Messungen anbietet, über ein Graphical User Interface (GUI) oder ein Command-Line Interface (CLI) verfügt und durch die Unterstützung einer Vielzahl von unterschiedlichen Protokollen und Formaten ein breites Anwendungsspektrum besitzt.

Für die Konvertierung der Rohdaten steht das Tool RTKCONV bzw. CONVBIN zur Verfügung. Postprocessing-Auswertungen erfolgen mit RNX2RTKP bzw. RTKPOST und Realtime-Auswertungen mit RTKRCV und RTKNAVI.

Ähnlich wie GrafNav bietet auch RTKLIB eine Vielzahl an Einstellmöglichkeiten für das Postprocessing, wie z.B. verschiedene Korrekturen für Ionosphäre und Troposphäre, Auswahl bzw.

(kombinierte) Auswertung verschiedener Satellitensysteme oder auszuschließende Satelliten. Diese lassen sich sehr einfach über die strukturierte Programmoberfläche einstellen und können in einer Konfigurationsdatei abgespeichert werden. Die Ergebnisdatei ist nicht konfigurierbar, beinhaltet aber im Header die wesentlichen Einstellungen für die Prozessierung und im „Solution body“ die einzelnen Zwischenlösungen mit den dazugehörigen Genauigkeitsangaben.

- Wa1 (Version 2.3b):

Mit dem Programm Wa1 können im Postprocessing statische und kinematische Basislinien ausgewertet werden. Dazu wird aus den im RINEX-Format vorliegenden GPS/GLONASS/SBAS-Beobachtungen zweier Stationen der 3D Raumvektor abgeleitet, über den sich die Koordinaten des Neupunktes letztendlich berechnen lassen. Wa1 ist auf eine Prozessierung ohne Nutzereingriff ausgelegt und unterstützt sowohl Einfrequenz- als auch Zweifrequenz-Beobachtungsdaten. Die Ergebnisse können in verschiedenen Formaten, die z.T. durch den Nutzer individuell konfiguriert werden können, ausgegeben werden. Anpassungen der Ergebnisausgabe an weitergehende spezifische Anforderungen sind dadurch möglich. Zwischenlösungen werden in dem optionalen, die Solution-Datei ergänzendem, log-File ausgegeben und sie unterscheiden sich in Art und Umfang von denen bei der GrafNav und der RTKlib Prozessierung. Es werden die einzelnen Rechenschritte von der relativen Positionierung mit Codemessungen über die Float Lösung mittels Phasenmessungen bis hin zur Fixed Lösung (vgl. WANNINGER 2000B) angegeben. In der Positionsdatei, die eigentlich nur für kinematische Basislinien vorgesehen ist, aber nach ZHANG 2016 auch für statische Basislinien verwendet werden kann, stehen die Koordinaten mit ihren Genauigkeitsinformationen der einzelnen (Mess-)Epochen sofern eine Fixed Lösung erreicht werden konnte.

Für den Vergleich der Basislinienprozessoren GrafNav, Wa1 und RTKLIB wurden die Daten der Woche 1624 (Februar 2011) aus dem Projekt Scharnebeck sowie die Daten der Wochen 1548 (September 2009 – Basislinie 11 und 12) und 1633 (April 2011 – Basislinie 21 und 22) aus dem Projekt Hornbergl mit möglichst gleichen bzw. vergleichbaren Einstellungen prozessiert. Dazu wurden alle drei Basislinienprozessoren in das System GeoSN integriert, so dass diese sowohl für das NRTP als auch für das Postprocessing verwendet werden können. Grundlage sind jeweils Epochen von 15 Minuten Dauer bei einer Aufzeichnungsrate von 1 Hz. Die Tabelle 23 und Tabelle 24 zeigen exemplarisch die Mittelwerte und Standardabweichungen der Prozessierung der Scharnebeck-Daten (nur GPS).

Tabelle 23: Vergleich Auswertesoftware, nur GPS, Pilotprojekt Scharnebeck

		Rohdaten						
		#	s <sub>x</sub> [m]	s <sub>y</sub> [m]	s <sub>z</sub> [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
BSL11	Wa1	672	0,0080	0,0056	0,0082	3756926,5888	695485,5190	5090089,7857
	RTKLIB	672	0,0406	0,0711	0,0429	3756926,5840	695485,5223	5090089,7852
	GrafNav	672	0,0232	0,0595	0,0249	3756926,5880	695485,5238	5090089,7868
BSL12	Wa1	672	0,0085	0,0053	0,0097	3756902,8473	695506,6222	5090104,3520
	RTKLIB	672	0,0378	0,0739	0,0441	3756902,8462	695506,6206	5090104,3509
	GrafNav	672	0,0261	0,0475	0,0201	3756902,8478	695506,6247	5090104,3532
BSL13	Wa1	672	0,0095	0,0091	0,0095	3756920,8810	695536,6712	5090087,0290
	RTKLIB	672	0,0322	0,0525	0,0323	3756920,8812	695536,6716	5090087,0296
	GrafNav	672	0,0117	0,0208	0,0128	3756920,8818	695536,6721	5090087,0292
BSL14	Wa1	672	0,0067	0,0032	0,0067	3756857,7997	695480,6130	5090140,9015
	RTKLIB	672	0,0294	0,0468	0,0309	3756857,8000	695480,6090	5090140,9010
	GrafNav	672	0,0277	0,0396	0,0231	3756857,8011	695480,6153	5090140,9035

Tabelle 24: Vergleich Auswertesoftware, nur GPS, Pilotprojekt Scharnebeck, mit Ausreißereliminierung

		Ausreißereliminierung						Änderung			Ausreißer		
		#	s <sub>x</sub> [m]	s <sub>y</sub> [m]	s <sub>z</sub> [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	#	%
BSL11	Wa1	665	0,0070	0,0037	0,0076	3756926,5889	695485,5192	5090089,7856	-0,0001	-0,0002	0,0001	7	1,0
	RTKLIB	606	0,0105	0,0115	0,0131	3756926,5901	695485,5199	5090089,7858	-0,0061	0,0024	-0,0006	66	9,8
	GrafNav	657	0,0069	0,0038	0,0089	3756926,5897	695485,5193	5090089,7859	-0,0017	0,0045	0,0009	15	2,2
BSL12	Wa1	669	0,0074	0,0036	0,0079	3756902,8472	695506,6225	5090104,3517	0,0001	-0,0002	0,0003	3	0,4
	RTKLIB	575	0,0135	0,0134	0,0162	3756902,8484	695506,6235	5090104,3524	-0,0022	-0,0030	-0,0014	97	14,4
	GrafNav	663	0,0072	0,0036	0,0091	3756902,8478	695506,6225	5090104,3523	0,0000	0,0022	0,0008	9	1,3
BSL13	Wa1	667	0,0070	0,0029	0,0073	3756920,8809	695536,6715	5090087,0291	0,0001	-0,0003	-0,0001	5	0,7
	RTKLIB	625	0,0134	0,0137	0,0145	3756920,8810	695536,6728	5090087,0294	0,0003	-0,0012	0,0001	47	7,0
	GrafNav	669	0,0074	0,0029	0,0085	3756920,8817	695536,6713	5090087,0291	0,0001	0,0008	0,0001	3	0,4
BSL14	Wa1	671	0,0065	0,0032	0,0062	3756857,7997	695480,6130	5090140,9014	0,0001	0,0000	0,0001	1	0,1
	RTKLIB	623	0,0136	0,0140	0,0138	3756857,8000	695480,6126	5090140,9027	0,0000	-0,0035	-0,0017	49	7,3
	GrafNav	663	0,0065	0,0033	0,0074	3756857,8002	695480,6132	5090140,9020	0,0009	0,0021	0,0015	9	1,3

Es ist festzuhalten:

- In Bezug auf die Standardabweichungen ergeben sich bei allen vier Basislinien mit Wa1 die besten und mit RTKLIB die schlechtesten Resultate, wobei nach der Ausreißereliminierung Wa1 und GrafNav auf gleichem Niveau sind.
- Vor der Ausreißereliminierung betragen die Unterschiede in den Koordinaten (Mittelwert)  $\leq 5$  mm, nach Ausreißereliminierung  $\leq 2$  mm.
- Bei RTKLIB treten die meisten Ausreißer (bis zu 14,4% der Epochenlösungen) auf. Dies führt nach deren Eliminierung zu einer deutlichen Verbesserung der Standardabweichungen, jedoch sind diese dennoch in den meisten Fällen weiterhin doppelt so groß wie bei Wa1 oder GrafNav.
- Während bei Wa1 durch die Eliminierung (max. 1% der Epochenlösungen) kaum eine Änderung der Koordinaten auftritt, führt die Mittelwertbildung durch Entfernen gravierend fehlerhafter



Resultate bei GrafNav (max. 2,2% Ausreißer bei den Epochenlösungen) zu einer Koordinatenänderung um 4,5 mm und bei RTKLIB (max. 14,4%) um 6,1 mm.

Die Tabelle 25 und Tabelle 26 zeigen ergänzend die Mittelwerte und Standardabweichungen der Prozessierung der Scharnebeck-Daten bei Verwendung von GPS & GLONASS (Wa1\* bzw. RTKLIB\*) im Vergleich zu der GPS Auswertung.

**Tabelle 25: Vergleich Auswertesoftware, GPS & GLONASS, Pilotprojekt Scharnebeck**

		Rohdaten						
		#	s <sub>x</sub> [m]	s <sub>y</sub> [m]	s <sub>z</sub> [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
BSL11	Wa1	672	0,0080	0,0056	0,0082	3756926,5888	695485,5190	5090089,7857
	Wa1*	672	0,0060	0,0063	0,0074	3756926,5877	695485,5191	5090089,7841
	RTKLIB	672	0,0406	0,0711	0,0429	3756926,5840	695485,5223	5090089,7852
	RTKLIB*	672	0,0644	0,0446	0,0607	3756926,5879	695485,5217	5090089,7895
BSL12	Wa1	672	0,0085	0,0053	0,0097	3756902,8473	695506,6222	5090104,3520
	Wa1*	672	0,0059	0,0072	0,0101	3756902,8460	695506,6227	5090104,3512
	RTKLIB	672	0,0378	0,0739	0,0441	3756902,8462	695506,6206	5090104,3509
	RTKLIB*	672	0,0230	0,0329	0,0269	3756902,8450	695506,6219	5090104,3526
BSL13	Wa1	672	0,0095	0,0091	0,0095	3756920,8810	695536,6712	5090087,0290
	Wa1*	672	0,0066	0,0027	0,0065	3756920,8806	695536,6724	5090087,0281
	RTKLIB	672	0,0322	0,0525	0,0323	3756920,8812	695536,6716	5090087,0296
	RTKLIB*	672	0,0382	0,0339	0,0474	3756920,8773	695536,6747	5090087,0306
BSL14	Wa1	672	0,0067	0,0032	0,0067	3756857,7997	695480,6130	5090140,9015
	Wa1*	672	0,0048	0,0045	0,0065	3756857,7989	695480,6131	5090140,9015
	RTKLIB	672	0,0294	0,0468	0,0309	3756857,8000	695480,6090	5090140,9010
	RTKLIB*	672	0,0220	0,0307	0,0226	3756857,7968	695480,6121	5090140,9030

**Tabelle 26: Vergleich Auswertesoftware, GPS & GLONASS, Pilotprojekt Scharnebeck, mit Ausreißereliminierung**

		Ausreißereliminierung						Änderung			Ausreißer		
		#	s <sub>x</sub> [m]	s <sub>y</sub> [m]	s <sub>z</sub> [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	#	%
BSL11	Wa1	665	0,0070	0,0037	0,0076	3756926,5889	695485,5192	5090089,7856	-0,0001	-0,0002	0,0001	7	1,0
	Wa1*	667	0,0048	0,0029	0,0061	3756926,5877	695485,5194	5090089,7841	0,0010	-0,0005	0,0016	5	0,7
	RTKLIB	606	0,0105	0,0115	0,0131	3756926,5901	695485,5199	5090089,7858	-0,0061	0,0024	-0,0006	66	9,8
	RTKLIB*	641	0,0157	0,0175	0,0187	3756926,5881	695485,5183	5090089,7862	-0,0004	0,0008	-0,0021	31	4,6
BSL12	Wa1	669	0,0074	0,0036	0,0079	3756902,8472	695506,6225	5090104,3517	0,0001	-0,0002	0,0003	3	0,4
	Wa1*	667	0,0049	0,0029	0,0064	3756902,8461	695506,6227	5090104,3512	0,0012	-0,0005	0,0008	5	0,7
	RTKLIB	575	0,0135	0,0134	0,0162	3756902,8484	695506,6235	5090104,3524	-0,0022	-0,0030	-0,0014	97	14,4
	RTKLIB*	635	0,0168	0,0175	0,0186	3756902,8461	695506,6213	5090104,3530	0,0000	0,0014	-0,0017	37	5,5
BSL13	Wa1	667	0,0070	0,0029	0,0073	3756920,8809	695536,6715	5090087,0291	0,0001	-0,0003	-0,0001	5	0,7
	Wa1*	669	0,0045	0,0023	0,0054	3756920,8804	695536,6724	5090087,0280	0,0006	-0,0012	0,0011	3	0,4
	RTKLIB	625	0,0134	0,0137	0,0145	3756920,8810	695536,6728	5090087,0294	0,0003	-0,0012	0,0001	47	7,0
	RTKLIB*	644	0,0158	0,0180	0,0188	3756920,8777	695536,6728	5090087,0293	0,0029	-0,0004	-0,0012	28	4,2
BSL14	Wa1	671	0,0065	0,0032	0,0062	3756857,7997	695480,6130	5090140,9014	0,0001	0,0000	0,0001	1	0,1
	Wa1*	669	0,0044	0,0026	0,0046	3756857,7989	695480,6132	5090140,9015	0,0009	-0,0002	0,0000	3	0,4
	RTKLIB	650	0,0167	0,0199	0,0193	3756857,7984	695480,6121	5090140,9031	0,0005	0,0010	-0,0016	22	3,3
	RTKLIB*	623	0,0136	0,0140	0,0138	3756857,8000	695480,6126	5090140,9027	0,0000	-0,0035	-0,0017	49	7,3

Es ist festzustellen:

- Bei der Prozessierung mit Wa1 ergeben sich wie zuvor bei allen vier Basislinien bedeutend geringere Standardabweichungen als bei der Prozessierung mit RTKLIB.
- Der Unterschied der Koordinaten beträgt zwischen der Prozessierung mit Wa1 und RTKLIB ohne Ausreißereliminierung bis zu 5 mm und reduziert sich durch die Ausreißereliminierung auf max. 2 mm.
- Durch eine Verwendung von GPS & GLONASS ergibt sich bei der Prozessierung mit Wa1 in den Koordinaten ein Unterschied von bis zu 2 mm ohne Ausreißereliminierung bzw. 1 mm mit Ausreißer-eliminierung und bei der RTKLIB Prozessierung von 4 mm (ohne) bzw. von 3 mm (mit Ausreißereliminierung).
- Bei RTKLIB bis zu 4 mm Unterschied in den Koordinaten (Mittelwert) durch Ausreißer-eliminierung.
- Bei Wa1 bis zu 2 mm Unterschied in den Koordinaten (Mittelwert) durch Ausreißereliminierung.

Im Anhang A 16 sind die entsprechenden Ergebnisse (Mittelwerte und Standardabweichungen) der Prozessierung der Daten vom Projekt Hornbergl (nur GPS) dargestellt. Alle Programme weisen sehr hohe Standardabweichungen auf, die auch nach der Ausreißereliminierung weit oberhalb der vom Projekt Scharnebeck liegen. Dies ist durch die ungünstigeren Bedingungen im Projekt Hornbergl begründet. Vor der Ausreißereliminierung unterscheiden sich die Koordinaten, die sich bei den verschiedenen Prozessoren ergeben, um bis zu 150 mm (Wa1 und RTKLIB, Basislinie 12) nach der Ausreißereliminierung um bis zu 60 mm – GrafNav weist nach der Ausreißereliminierung die geringsten Standardabweichungen auf.

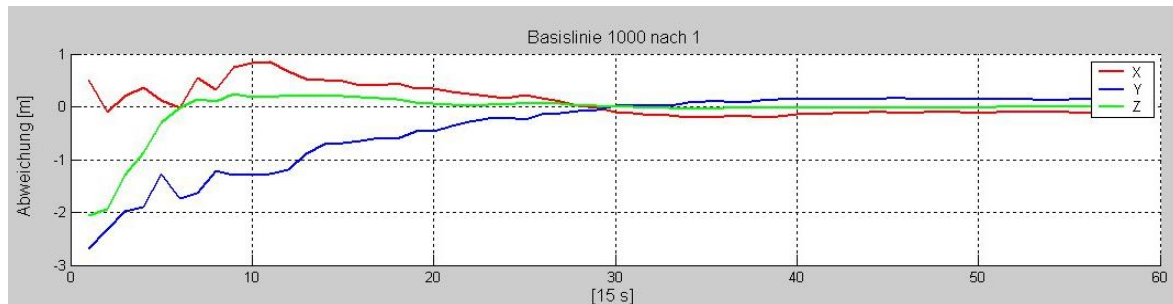
### **5.2.5 Weiterführende Untersuchungen**

Um Erkenntnisse zu den Hauptursachen von unbefriedigenden Epochenlösungen der Prozessierung zu gewinnen, wurden die Ergebnisdateien bzw. log-Files der Basislinienprozessoren untersucht, die als ASCII-Datei für jede berechnete Basislinie vorliegen. Diese beinhalten i.d.R. die Zwischenergebnisse einer Epoche (vgl. Abschnitt 5.2.4).

#### Analyse des Konvergenzverhaltens bei der GrafNav Prozessierung

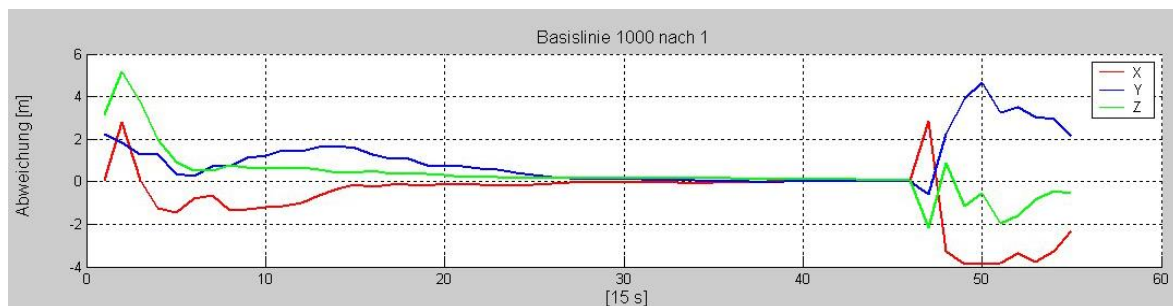
Unter normalen bzw. ungestörten Beobachtungsbedingungen konvergiert die Lösung kontinuierlich über die Zeit und die Standardabweichungen erreichen bei einer Fixed Lösung Werte im Millimeterbereich. Werden keine zu gravierenden Störungen vom Basislinienprozessor detektiert und alle Mehrdeutigkeiten gelöst, steht in der letzten Zeile der Ergebnisdatei die Fixed Lösung. Das

Konvergenzverhalten einer ungestörten Epoche zeigt Abbildung 39. Die berechnete Abweichung bezieht sich in diesem und den folgenden Beispielen auf eine der jeweiligen Epoche zu Grunde gelegte Sollkoordinate, die über eine polynombasierte Trendschätzung über einen Jahreszeitraum gewonnen wurde.



**Abbildung 39: Konvergenzverhalten einer „ungestörten“ Epoche (1445\_209700; Basislinie 1000 nach 1)**

Anhand des obig dargestellten Beispiels ist ersichtlich, dass bei guten Beobachtungsbedingungen bereits kurz nach der Hälfte der gewählten Epochenlänge eine ausreichende Konvergenz der Lösung erreicht wäre. Ein Beispiel zum Konvergenzverhalten bei schwierigen Beobachtungsbedingungen zeigt Abbildung 40.



**Abbildung 40: Konvergenzverhalten einer „gestörten“ Epoche (1445\_198000; Basislinie 1000 nach 1)**

Während zunächst ein unauffälliges Konvergenzverhalten zu beobachten ist, tritt kurz vor Ende eine Störung auf, die zu einer „Neuinitialisierung“ bzw. einem Neustart der Lösungskonvergenz führt. Die verbleibenden Beobachtungsdaten in dieser Epoche reichen nicht mehr aus, um eine korrekte Lösung zu erreichen. Tabelle 27 zeigt einen Auszug aus der GrafNav Ergebnisdatei zu dem in Abbildung 40 dargestellten gestörten Konvergenzverhalten.

Tabelle 27: Auszug GrafNav-Ergebnisdatei einer „gestörten“ Epoche (1445\_198000; Basislinie 1000 nach 1)

GPS Zeit [s]	X [m]	Y [m]	Z [m]	s <sub>L</sub> [m]	s <sub>H</sub> [m]
...	...	...	...	...	...
198660	4245876,440	798715,454	4678632,169	0,282	0,100
198675	4245876,458	798715,446	4678632,161	0,281	0,100
198690	4245876,457	798715,464	4678632,161	0,280	0,100
198705	4245876,478	798715,432	4678632,148	0,280	0,100
198720	4245876,474	798715,468	4678632,149	0,279	0,100
<b>198750</b>	<b>4245876,490</b>	<b>798715,424</b>	<b>4678632,137</b>	<b>0,278</b>	<b>0,100</b>
<b>198765</b>	<b>4245879,301</b>	<b>798714,815</b>	<b>4678629,896</b>	<b>4,422</b>	<b>8,007</b>
198780	4245873,155	798717,640	4678632,913	3,131	5,665
198795	4245872,570	798719,325	4678630,934	2,493	3,902
198810	4245872,553	798720,101	4678631,509	2,094	2,699
198825	4245872,616	798718,671	4678630,112	1,819	1,951
198840	4245873,080	798718,932	4678630,475	1,612	1,480
198855	4245872,670	798718,480	4678631,225	1,446	1,168
198870	4245873,166	798718,337	4678631,597	1,310	0,951
<b>198885</b>	<b>4245874,135</b>	<b>798717,547</b>	<b>4678631,511</b>	<b>0,004</b>	<b>0,005</b>

Zwischen Sekunde 198750 und 198765 tritt eine Störung auf, die den Basislinienprozessor zu einem Neubeginn der Lösung zwingt. Als hochgradig kritisch ist das weitere (Lösungs-)Verhalten des Prozessors einzustufen. Trotz einer Neuinitialisierung kurz vor Epochenende wird für das dargestellte Beispiel eine Fixed Lösung erreicht. Die vom Prozessor ausgegebenen Standardabweichungen von 4 mm für die Lage und 5 mm für die Höhe lassen eine qualitativ hochwertige Epochenlösung vermuten, jedoch beträgt in diesem Fall die horizontale Abweichung von der Sollkoordinate für das Endergebnis 2,7 m. Kurz vor der Störung bei Sekunde 198750, hatte sich zum Vergleich die Lösung bereits auf 2,5 cm in der Lage an die Sollkoordinate angenähert.

Als Ursache für die Neuinitialisierung konnte bei Analyse des Beobachtungsdatensatzes eine Konstellationsänderung identifiziert werden – ein zusätzlicher Satellit, der die Mindestelevation von 10° überschritten hatte, stand nun zur Verfügung.

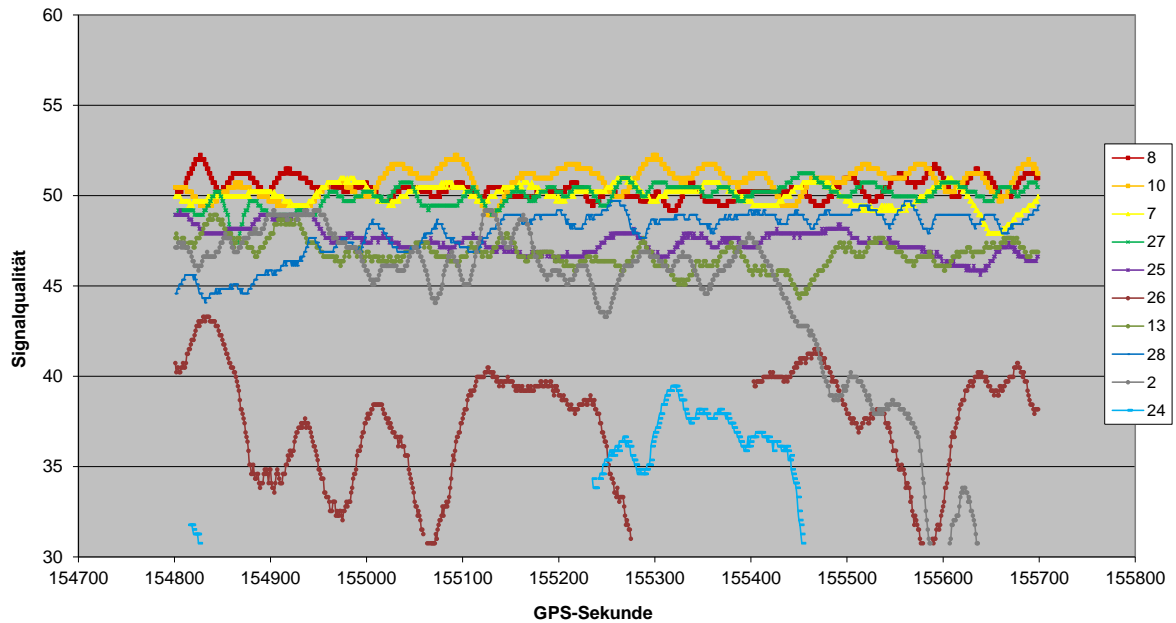
Aufgrund dieses Verhaltens ist ersichtlich, dass eine qualitative Beurteilung eines GrafNav-Prozessierungsergebnis auf Basis der Kriterien Fixed oder Float Lösung sowie der für die Lösung angegebenen Standardabweichungen allein nicht möglich bzw. nicht sinnvoll ist. Daher ist der gesamte Verlauf einer Epochenlösung für eine zuverlässigere Beurteilung automatisiert zu betrachten. Darüber hinaus bietet die Analyse des Konvergenzverhaltens einer Epoche ebenfalls die Möglichkeit, bei Detektieren einer Störung zu Beginn oder Ende der jeweiligen Epoche eine dynamische Anpassung des Beobachtungszeitraumes vorzunehmen. Das Entfernen eines Teilbereiches kann durch Hinzunahme von Daten aus einer vor- oder nachfolgenden Epoche kompensiert

werden. Eine derartige Modifizierung des Programmworkflows im Rahmen dieser Arbeit erreichte ein experimentelles, aber vielversprechendes Prototypenstadium.

#### Analyse der Abwahl von Satelliten auf Basis von starr zu definierenden Schwellwerten für Elevation, Signalqualität und Anzahl von Trägerphasenbeobachtungen

Nachdem, wie in obigen Abschnitt gezeigt, eine Konstellationsänderung der Satelliten einen entscheidenden Einfluss auf eine Epochenlösung haben kann, wurde die automatische Auswahl der Satelliten, die vom Basislinienprozessor für die Auswertung herangezogen werden, näher betrachtet. Die Entscheidung, ob Beobachtungsdaten in die Prozessierung eingehen oder verworfen werden, wird anhand der vom Benutzer zu definierenden Schwellwerte der Hauptauswahlkriterien Elevation, Signalqualität sowie Anzahl zur Verfügung stehender Trägerphasenbeobachtungen getroffen. Insbesondere bei als „schwierig“ bzw. „ungünstig“ einzustufenden Beobachtungsbedingungen, wie diese im Projekt Hornbergl teilweise auftreten, scheint die vom Prozessor vorgenommene Auswahl auf Basis der starr zu definierenden Schwellwerte, Schwächen aufzuweisen.

Im Folgenden wird eine weitere problematische Epoche aus dem Projekt Hornbergl bezüglich ihrer Signalqualitätswerte eingehender betrachtet. In Abbildung 41 sind die SNR-Werte aller aufgezeichneten GPS Satelliten auf Punkt #2 für die Epoche 1549\_154800 graphisch aufgetragen. In der sich über 900 s erstreckenden Epoche liegen Beobachtungsdaten von zehn GPS Satelliten vor. Während sieben Satelliten ununterbrochen mit einer Signalqualität  $\geq 43$  dB aufgezeichnet wurden, liegen für die Satelliten #2, #26 und #24 weniger Trägerphasenbeobachtungen vor, deren SNR bis an einen Wert von 30 dB heranreicht. Von besonderem Interesse in der gezeigten Beispielenpoche ist Satellit #2, der zu Beginn der Epoche mit SNR Werten von  $\geq 43$  dB getrackt wird und zum Ende hin nur noch ein SNR von 30 dB aufweist. In vielen Fällen ist ein niedriger SNR mit auftretenden Abschattungen bzw. Hindernissen korreliert. Der stetig abnehmende SNR Wert von Satellit #2 weist auf einen hinter einem Hindernis „untergehenden“ Satelliten hin. Dieser muss nicht zwangsweise vollständig aus der Epoche entfernt werden, sondern lediglich die Beobachtungsdaten bei Annäherung an das Hindernis bzw. bei Unterschreiten eines SNR Wertes von z.B. 43 dB wären im Weiteren nicht zu berücksichtigen.



**Abbildung 41: Signalqualitätswerte der Epoche 1519\_154800 von #2 Pilotprojekt Hornbergl**

Die ursprüngliche Prozessierung in GrafNav mit automatischer Auswahl der Satelliten auf Basis der voreingestellten Auswahlkriterien erfolgte unter der Verwendung von acht Satelliten. Vom Prozessor als auszuschließen selektiert wurden die Satelliten #24 und #26, die das Kriterium für den minimalen SNR unterschritten. Satellit #24 verfügt darüber hinaus im Beobachtungszeitraum nicht über die minimale Anzahl an Trägerphasendaten. Die resultierenden Standardabweichungen lagen im Bereich mehrerer Dezimeter - das Prozessierungsergebnis ist unbefriedigend.

Eine erneute Prozessierung dieser Epoche mit zusätzlichem Ausschluss des Satelliten #2 sowie des Satelliten #13 ergab ein signifikant verbessertes Ergebnis (vgl. Tabelle 28). Satellit #13 wurde auf der Referenzstation auf Grund eines schlechten Trackings manuell als auszuschließen detektiert, da für die Prozessierung selbstverständlich neben dem Trackingverhalten auf dem Objektpunkt auch das Trackingverhalten auf Referenzstation zu berücksichtigen ist und somit nur die Satelliten in die Basislinienberechnung eingehen sollten, die auf beiden Stationen unter guten Bedingungen beobachtet wurden.

**Tabelle 28: Gegenüberstellung der Prozessierungsergebnisse „standard“ vs. „optimiert“**

Abweichung zum Sollwert	Epoche 1519 154800 Prozessierung		Epoche 1519 171900 Prozessierung	
	standard	optimiert	standard	optimiert
$\Delta H$ [m]	0,189	-0,006	-0,243	-0,001
$\Delta R$ [m]	0,740	0,004	-0,136	-0,001
$\Delta h$ [m]	0,558	0,026	0,024	0,001
# Satelliten	8	6	7	6

Wie die Gegenüberstellung zeigt, konnte durch die optimierte Satellitenauswahl für die in Abbildung 41 dargestellte Epoche 1519\_154800, sowie für eine weitere exemplarisch gewählte Epoche (1519\_171900), ein zuvor als „Ausreißer“ einzustufendes Prozessierungsergebnis, durch eine zusätzliche Abwahl von Satelliten in eine verwertbare Epoche umgewandelt werden. Diese Art der optimierten Satellitenauswahl ist mit starren Grenzwerten für Signalqualität und Elevation nicht möglich; hier gilt es durch weitere Untersuchungen geeignete Kriterien zu finden. Ferner ist es notwendig, die optimierte Satellitenauswahl in die Near Realtime-Prozessierung zu implementieren.

#### Implementierung der optimierten Satellitenauswahl in das Near Realtime Processing:

Die in obigen Abschnitten manuell durchgeführte Analyse und Selektion der von der Prozessierung auszuschließenden Satelliten, galt es in Form einer automatisierten Voranalyse in den Programmablauf zu implementieren. Für einen Ausschluss der Satelliten in Near Realtime muss die Bestimmung bzw. das Entnehmen der Signalqualitäts-, der Elevations- und/oder der Azimutwerte aus den Satellitennachrichten unverzüglich erfolgen. Eine Speicherung sowie die Bearbeitung dieser Werte in einer ASCII-Datei ist zeitintensiv (vgl. Abschnitt 4.2.2), weshalb es empfehlenswert ist, mit Binärdaten und Datenbanken zu arbeiten, zumal die Rohdaten i.d.R. im binären Format vorliegen bzw. von den Empfängern ausgegeben werden. Für das automatische Ausschließen von Satelliten aufgrund ihrer Signalqualitätswerte bzw. anhand einer azimutabhängigen Grenzelevation wurden weitere Beobachtungsdaten in Form von zusätzlichen Nachrichten an den Empfängern ausgelesen (SSII ID 33, V1G ID 43 und ID 48, Lea 0130 – vgl. Anhang A 2 bis A 4) und mit in die log-Dateien bzw. unmittelbar in die Datenbank geschrieben.

Bei den in Abschnitt 5.2.4 untersuchten Basislinienprozessoren erfolgt das Ausschließen von Satelliten auf unterschiedliche Art und Weise.

- RTKLIB (vgl. TAKASU 2010B):
  - „-x Satellitennummer“ im Aufruf der Konvertierung
  - „pos1-exclsats = # (prn ...)“ in der Konfigurationsdatei
- Wa1 (vgl. WASOFT 2010B):
  - „DeleteSV=.“ im Aufruf der Prozessierung
  - „DeleteSV= “ in der Konfigurationsdatei
- GrafNav (vgl. NOVATEL 2006A):
  - „Omit\_SATS=1 2 3“ in der Konfigurationsdatei
  - „OMIT = PROC ALL 1 ALL“ im Aufruf der Prozessierung
  - „OMIT = PROC ALL 2 RANGE 0.0 123456.0“ im Aufruf der Prozessierung

Das zeitweises Ausschließen von Satelliten, bei dem ein oder mehrere Satelliten nicht für eine gesamte Epoche, sondern nur für ein definierbares Beobachtungszeitfenster von der Prozessierung ausgenommen werden, ist bei den untersuchten Basislinienprozessoren nur bei GrafNav unmittelbar durch Angabe des Zeitraumes möglich. Bei der Prozessierung mit RTKLIB sowie mit Wa1 sind die entsprechenden Beobachtungen aus den RINEX-Dateien vorab zu eliminieren. Aus diesem Grund erfolgten die nachfolgenden Untersuchungen lediglich mit dem Basislinienprozessor GrafNav.

Das Implementieren einer automatisierten Eliminierung von Satelliten basierend auf einer azimutabhängigen Grenzelevation erfordert für jeden einzelnen Beobachtungspunkt eine Abschattungsmaske (Azimut 0-355° in beispielsweise 5°-Schritten). Zum Hinterlegen der Abschattungsmaske in der Datenbank wurde die Tabelle gns\_obstruction mit den azimutabhängigen Grenzelevationen aller Stationen angelegt (vgl. Tabelle 29). Diese wird vor der Basislinienprozessierung mit der Tabelle gns\_azel, die die für alle getrackten Satelliten aufgezeichneten Werte enthält (epoch\_id, station\_id, Sekunde, Sat\_id, Azimut und Elevation), verglichen um Satelliten unterhalb der azimutabhängigen Grenzelevation eliminieren zu können.

**Tabelle 29: Auszug Tabelle gns\_obstruction, Pilotprojekt Hornbergl**

Azimut [°]	Grenzelevation [°]		
	Ref	#1	#2
0	20	26	40
5	18	16	40
10	17	5	40
15	16	4	40
20	15	3	40
25	16	2	41
...	...	...	...

Es ist zu berücksichtigen, dass sobald die vom Basislinienprozessor standardmäßig voreingestellte Elevationsmaske (Standardeinstellung: 10°) genutzt wird, nur Satelliten ab dieser verwendet werden, auch wenn die azimutabhängige Grenzelevation unterhalb dieser liegt. Ein Absenken der „Prozessor-maske“ auf eine Mindestelevation von 5° bei Verwendung der azimutabhängigen Grenzelevation ist gerade bei schwierigen Bedingungen, bei denen zwischen einem höherem Messrauschen aufgrund niedriger Elevation und einer besseren Satellitenkonstellation abzuwägen ist, sinnvoll. Die im vorherigen Abschnitt beschriebene Störung im Konvergenzverhalten von Epoche 1445\_198000 (Basislinie 1000 nach 1) tritt bei einer Grenzelevation von 5° nicht auf; die hier zur Verfügung stehende Satellitenkonstellation lässt das Prozessierungsergebnis bis auf 0,01 m an die Soll-kordinate annähern. Ferner ist die Verwendung der Funktion „carrier locktime cut-off“ sinnvoll, bei



der angegeben werden kann, wie viele Sekunden nach dem Erscheinen/Tracken eines Satelliten dessen Trägerphasenmessungen nicht verwendet werden sollen.

Erste Ergebnisse des vorgeschalteten und sich noch im Entwicklungsstadium befindlichen Analysetools zum Ausschließen von Satelliten auf Basis einer azimutabhängigen Grenzelevation lieferten sehr vielversprechende Ergebnisse – die Anzahl letztendlich verwertbarer Epochen konnte mit Steigerungsraten von bis zu 10% signifikant erhöht werden.

Mögliche Kriterien für einen Ausschluss eines Satelliten aufgrund seiner Signalqualität sind z.B.:

- Signalqualität unterhalb eines bestimmten Wertes (z.B. 45 dB, abhängig vom Empfängertyp)
- Anzahl der Beobachtungen
- Mittlere Signalqualität
- Schwankungen/Streuung der Signalqualität

Wie bereits erwähnt, ist ein starrer Schwellwert für die Signalqualität ungeeignet, da diese je nach Empfängertyp sowie Elevation und Azimut variieren. Die Möglichkeit eines Vergleichs zwischen erwarteter und gemessener Signalqualität ist aufgrund in der Praxis fehlenden Templates nicht möglich (vgl. ZHANG 2016). Um dennoch die Signalqualität als mögliches Kriterium für den Ausschluss von Satelliten zu nutzen, ist eine Untersuchung, ob die Signalqualität vereinzelt, mehrfach oder sogar fortlaufend unterhalb eines bestimmten Wertes ist, sowie eine Abstufung mittels mehrerer Grenzwerte denkbar. Neben der reinen Anzahl der Beobachtungen ist es nicht unerheblich, ob diese am Stück auftreten oder in mehrere Intervalle getrennt sind. Die mittlere Signalqualität sowie die mittlere Streuung der Signalqualität sind ebenfalls ein mögliches Indiz für die Qualität der Beobachtungsdaten. Beispielhaft wurden für die Epoche 1519\_154800 von Punkt #2 im Pilotprojekt Hornbergl die genannten Kriterien bestimmt (vgl. Tabelle 30).

**Tabelle 30: Mögliche Kriterien für die Beispielepoche 1519\_154800 von Punkt #2 im Pilotprojekt Hornbergl**

Satellit	Anzahl der Beobachtungen	mittlere Signalqualität	mittlere Streuung
2	818	43,7	3,0
7	900	48,8	0,4
8	900	49,2	0,4
10	900	49,5	0,6
13	900	45,7	0,6
24	232	35,4	1,4
25	900	46,3	0,6
26	764	36,6	2,5
27	900	48,8	0,5
28	900	46,8	1,0

Die beiden vom Basislinienprozessor bereits bei der ursprünglichen Prozessierung ausgeschlossenen Satelliten #24 und #26 würden auch anhand der in Tabelle 30 dargestellten Kriterien als ungünstig identifiziert werden. Satellit #24 wäre anhand der geringen Beobachtungsanzahl, der niedrigen mittleren Signalqualität sowie der hohen mittleren Streuung und Satellit #26 wäre aufgrund der niedrigen mittleren Signalqualität sowie der hohen mittleren Streuung für die Eliminierung selektiert worden. Der bei der optimierten Prozessierung ebenfalls nicht berücksichtigte Satellit #2 wäre aufgrund der hohen mittleren Streuung negativ aufgefallen und ggf. auch anhand der mittleren Signalqualität, sofern der Grenzwert bei 45 dB gesetzt worden wäre.

Die Prozessierungen in Tabelle 28 sind jeweils ohne Ausschluss von Satellit #28 erfolgt und betrachtet man Abbildung 41, so ist auch kein Anzeichen für die Notwendigkeit eines Ausschlusses zu erkennen. Der höhere Wert für die mittlere Streuung der Signalqualität in Tabelle 30, der in Abhängigkeit der Grenzwertfestlegung zu einem Ausschluss führen könnte, ist hier durch das Aufsteigen des Satelliten hinter einem Hindernis zu Beginn der Epoche begründet. Ein teilweises Ausschließen des Satelliten wird für sinnvoll erachtet. Aus diesem Grund wurden die Kriterien angepasst, um z.B. auch Abschnitte mit niedrigen Signalqualitäten wie bei Satellit #2 und Satellit #28 detektieren und eliminieren zu können. Dafür wurde eine Intervalllänge definiert, anhand derer die Epochen in mehrere Abschnitte unterteilt wurden, die auf maximale Differenz zwischen minimaler und maximaler Signalqualität untersucht wurden. Die Prozessierung der GPS Woche 1580 vom Pilotprojekt Hornbergl für die Basislinien 11 und 12 erfolgte anhand der in Tabelle 31 dargestellten Kriterien in mehreren Durchgängen.

**Tabelle 31: Untersuchte Einstellungen zur Elimination weiterer Satelliten**

Durchgang	1	2	3	4	5	6
Minimale Anzahl der Tracks	450	450	600	300	300	600
Anteil der SNR Werte > 45 dB	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Minimale Anzahl Tracks mit SNR > 45 dB	300	300	400	120	0	0
Max. Differenz zw. max und min SNR	3,4	5	5	5	5	5
Intervalllänge	150	150	150	90	90	90
Max. Differenz zw. max und min (Detail)	3,4	5	5	5	5	10
Min Anzahl zusammenhängender Intervall	2	2	2	2	2	2

Als Kriterien untersucht sind die minimale Anzahl an Beobachtungen, der Anteil der SNR Werte > 45 dB, die minimale Anzahl an Beobachtungen mit einer Signalqualität > 45 dB, die Intervalllänge, die maximale Differenz zwischen maximaler und minimaler Signalqualität sowohl für die gesamte Epoche als auch für die entsprechend der Intervalllänge entstehenden Abschnitte und die Mindestanzahl zusammenhängender Intervalle. In Tabelle 32 sind die resultierenden Koordinaten sowie die Standardabweichungen für die einzelnen Durchgänge nach der Ausreißereliminierung für beide Basislinien dargestellt. In Anhang A 17 sind die Ergebnisse vor der Ausreißereliminierung der Vollständigkeit halber ebenfalls aufgeführt. Durchgang D<sub>0</sub> ist die ursprüngliche „Standard-“ Prozessierung.

**Tabelle 32: Mittelwerte und Standardabweichungen der untersuchten Einstellungen**

	BL	#	R [m]	H [m]	h [m]	s <sub>R</sub> [m]	s <sub>H</sub> [m]	s <sub>h</sub> [m]
D <sub>0</sub>	11	476	24177,2406	5259264,6555	1667,1541	0,0119	0,0089	0,0215
D <sub>1</sub>	11	352	24177,2386	5259264,6538	1667,1569	0,0079	0,0110	0,0213
D <sub>2</sub>	11	393	24177,2389	5259264,6548	1667,1568	0,0093	0,0121	0,0222
D <sub>3</sub>	11	347	24177,2386	5259264,6538	1667,1574	0,0096	0,0142	0,0238
D <sub>4</sub>	11	418	24177,2387	5259264,6540	1667,1549	0,0079	0,0114	0,0217
D <sub>5</sub>	11	418	24177,2387	5259264,6540	1667,1549	0,0079	0,0114	0,0217
D <sub>6</sub>	11	412	24177,2387	5259264,6542	1667,1552	0,0078	0,0108	0,0213
D <sub>0</sub>	12	519	24109,7946	5259291,7929	1718,9257	0,0079	0,0098	0,0208
D <sub>1</sub>	12	426	24109,7915	5259291,7936	1718,9266	0,0055	0,0097	0,0196
D <sub>2</sub>	12	444	24109,7917	5259291,7933	1718,9272	0,0057	0,0100	0,0196
D <sub>3</sub>	12	402	24109,7917	5259291,7934	1718,9260	0,0057	0,0100	0,0189
D <sub>4</sub>	12	468	24109,7920	5259291,7937	1718,9266	0,0068	0,0098	0,0194
D <sub>5</sub>	12	467	24109,7920	5259291,7937	1718,9267	0,0068	0,0098	0,0193
D <sub>6</sub>	12	467	24109,7919	5259291,7936	1718,9265	0,0068	0,0100	0,0195

Es ist festzustellen:

- Bei allen Durchgängen ist die Anzahl der Lösungen sowohl vor als auch nach der Ausreißereliminierung geringer.
- Die Koordinaten unterscheiden sich nach der Ausreißereliminierung im Millimeterbereich.
- Die Standardabweichungen weisen große Unterschiede vor der Ausreißereliminierung auf, liegen nach der Ausreißereliminierung jedoch nur noch im Millimeterbereich.
- Die erhofften Verbesserungen bleiben letztlich aus. Die bisherigen Untersuchungen bzw. gesetzten Parameter sind noch nicht zielführend. Die Grundlage für weitere Analysen auf Basis geänderter Kriterien ist jedoch mit der bisherigen Implementierung geschaffen. Diese gilt es um eine Kombination aus azimutabhängiger Grenzelevation und signalstärkenbasierten Ausschluss von Satelliten in einem integrativen Ansatz zu erweitern.

## 6 Fazit und Ausblick

Die Eignung sowie das Potential von GNSS Einfrequenz-Empfängern mit Trägerphasenausgabe für den Einsatz in kosteneffizienten GNSS Monitoring-Systemen für ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen wurde im Rahmen dieser Arbeit anhand von Pilotprojekten mit teilweise langjährigen operationellem Einsatz untersucht. Während üblicherweise zur Detektion von Bewegungen im Millimeterbereich geodätische Zweifrequenz-Empfänger verwendet waren, ist ein zuverlässiger Nachweis von Bewegungen dieser Größenordnung mittels einer PDGNSS Auswertung in Near Realtime auch mit kostengünstiger L1-Sensorik unter gewissen Voraussetzungen möglich. Die resultierenden geringeren Investitionskosten pro Messpunkt ermöglichen bei gleichbleibendem Budget eine höhere Punktdichte an den zu überwachenden Objekten bzw. können bei kleineren Budget auf diese Weise Bauwerke und natürliche Objekte überhaupt erst kontinuierlich beobachtet werden, wo dies bisher prinzipiell zwar zu fordern war, aber aus Kostenerwägungen unterblieben ist oder nur eingeschränkt, z.B. durch sporadische Messungen, erfolgte.

Das Abgeben einer konkreten Empfehlung eines bestimmten GNSS Empfängertyps, Antennentyps oder Basislinienprozessors für eine optimale Zusammenstellung eines kosteneffizienten GNSS Monitoring-Systems ist auf Basis der in den Pilotprojekten und mit den zahlreichen aus weiteren Untersuchungen gewonnenen Erkenntnissen nicht möglich bzw. wird als nicht sinnvoll erachtet. Unterschiedliche Voraussetzungen und Bedingungen in dem jeweiligen Projekt erfordern eine umfassende Voranalyse und Bewertung sowie eine auf die Zielsetzung bzw. die Erwartungen abgestimmte sorgfältige Auswahl an Komponenten. Eine Trennung von Empfänger und Antenne hat sich als empfehlenswert herausgestellt. Der empfindlichere Empfänger kann so geschützt mit den anderen Komponenten eines Sensoriknotens in einer separaten Einhausung untergebracht werden – nur die im Allgemeinen robustere Antenne ist den Umgebungsbedingungen direkt ausgesetzt. Ein Einsatz sogenannter Development Kits, bei denen ungekapselte Sensorboards, die zu deutlich günstigeren Konditionen erhältlich sind und in eigens konzipierte Systeme integriert werden können, ist dadurch ebenfalls möglich.

Neben der Wahl geeigneter Hardwarekomponenten hat sich im Rahmen der Arbeit insbesondere die GNSS Auswertesoftware als die maßgebliche Komponente eines Monitoring-Systems für die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Endresultate herauskristallisiert. Es wurde gezeigt, dass die Ergebnisse der Basislinienprozessoren, die mit den empfohlenen Standardvoreinstellungen gewonnen wurden, unter ungünstigen Beobachtungsbedingungen in einer Vielzahl von Fällen kritisch zu hinterfragen sind. Eine Auswertung mit einer optimierten Satellitenauswahl durch Einführung einer abschattungsbedingten Grenzelevation, verbesserte Kriterien für die Auswahl von

Beobachtungsdaten in Punkto Signalqualität sowie die Nutzung von dynamischen bzw. variablen Epochenlängen, um zum Einen die Anzahl verwertbarer Epochen steigern zu können, sowie zum Anderen die parallele Nutzung von Mehrstunden- oder Tageslösungen zu ermöglichen, führt zu einer signifikanten Steigerung von Zuverlässigkeit und Genauigkeit. Der Einsatz von Multi-GNSS-Empfängern sowie die durch ein geeignetes Netzlayout nutzbare Überbestimmung in einer Netzausgleichung haben gezeigt, dass Genauigkeitssteigerungen von bis zu 65% möglich sind.

Nicht alle der vorgestellten Programmmodule erreichen gegenwärtig einen „finalen“ Entwicklungsstatus und sind daher noch nicht vollständig in der GeoSN-Software integriert. Die im Rahmen der weitergehenden Auswertung benötigten zusätzlichen Daten(mengen) sowie die Vorgabe, durch weitere Verarbeitungsschritte keine zusätzliche Verzögerung bei der Ergebnisbereitstellung in Kauf nehmen zu müssen, macht die Integration einer Datenbank in das Programm obligatorisch.

## 7 Literaturverzeichnis

- ALBERDING (2014): Datenblatt Alberding A07 Positionierungs- und Telemetriesystem, Alberding GmbH, Wildau, Deutschland, [https://www.alberding.eu/pdf/de\\_A07\\_data\\_sheet\\_web.pdf](https://www.alberding.eu/pdf/de_A07_data_sheet_web.pdf)
- ALBERDING (2015): Datenblatt Alberding A07 Monitoringsystem, Alberding GmbH, Deutschland [https://www.alberding.eu/pdf/de\\_A07\\_Monitoringsystem\\_300.pdf](https://www.alberding.eu/pdf/de_A07_Monitoringsystem_300.pdf)
- ALBERT, L., VENNEBUSCH, M., SCHÖN, S., WURPTS, A., HEGEMANN, C. (2010): Präzise Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten mit low-cost GNSS Empfängern. Vortrag im Rahmen der Geodätischen Woche 2010, Köln, 06. Oktober 2010
- ALKAN, R. M. (2010): Development of a low-cost Positioning System using OEM GPS Receivers and Usability in Surveying Applications. FIG Congress 2010, Sydney, Australien, 11.-16. April 2010
- ALLAIN, D. J., MITCHELL, C. N. (2008): Ionospheric delay corrections for single-frequency GPS receivers over Europe using tomographic mapping. *GPS Solutions*, 13 (2), S. 141-151
- ANDERSSON, J. V. (2008): A complete model for displacement monitoring based on undifferenced GPS Observations. Dissertation, Geodesy Report No 1066, Division of Geodesy, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Schweden
- ANDREE, P., WÜBBENA, G., BAGGE, A., SCHMITZ, M. (2001): Hochpräzise GPS-gestützte Bauwerksmessungen in Echtzeit. BAW – Kolloquium „Messwertgestützte Nachweise für Wasserbauwerke“, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Hannover, 17. Oktober 2001
- BACKHAUSEN, D., BÄUMKER, M., FITZEN, H.-P. (2000): Hochgenaue Überwachung von Bauwerken mit fest installierten Real Time GPS-Systemen. In *Zeitschrift für Vermessungswesen* 11/2000, Vol. 125, Nr. 11, S. 369-376
- BAUERSIMA, I. (1983): Navstar/Global Positioning System (GPS). *Mitteilungen der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald*, Nr. 10, Bern, Schweiz
- BÄUMKER, M., FITZEN, H.-P. (1998): High Precision Slow Motion Monitoring with Low Cost GPS Receivers in Real Time. IAG-Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering 1998, Eisenstadt, 20.-22. April 1998
- BÄUMKER, M., FITZEN, H.-P., BACKHAUSEN, D. (2000): Dreidimensionale permanente Überwachung der Edertalsperre mit GPS. In: *Ingenieurvermessung 2000, XIII. International Course on Engineering Surveying*, TU München, 13. - 17. März 2000.

- BENN, W. (2005): Datenbank-Grundlagen. Vorlesungsunterlagen Datenbanken 1, Einheit 00, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Informatik, Professur für Datenverwaltungssysteme, 2005
- BENT, R. B., LLEWELLYN, S. K., WALLOCH, M. K. (1972): Description and Evaluation of the Bent Ionospheric Model. DBA Systems, Inc., Melbourne, Florida, Oktober 1972
- BEUTLER, G., BAUERSIMA, I., GURTNER, W., ROTHACHER, M., SCHILDKNECHT, T., GEIGER, A. (1987): Atmospheric Refraction and other important biases in GPS carrier phase observations, Mitteilungen der Satellitenbeobachtungsstation Zimmerwald Nr. 22, Universität Bern, 1987 (zitiert nach GÖRRES 1996)
- BILICH, A., LARSON, K.M. (2007): Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ratio (SNR). Radio Science, Vol. 42, RS6003, American Geophysical Union
- BOND, J. (2007): Bringing GPS into Harsh Enviroments for Deformation Monitoring. Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, Technical Report No. 253, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada
- BRAASCH, M. (1992): On the characterization of multipath errors in satellite-based precision approach and landing systems. Dissertation, Faculty of the College of Engineering and Technology, Ohio University, USA
- BROWN, N., TROYER, L., ZELZER, O., VAN CRANENBROEK, J. (2006): Advances in RTK and Post Processed Monitoring with Single Frequency GPS. In: Journal of Global Positioning Systems 2006, Vol. 5, No. 1-2, S. 145-151
- BRUNNER, F. K., HARTINGER, H., TROYER, L. (1999): GPS signal diffraction modelling: the stochastic SIGMA- $\Delta$  model. Journal of Geodesy 1999, 73: S. 259 - 267
- BRUNNER, F. K., HARTINGER, H., RICHTER, B. (2000A): Continuous monitoring of landslides using GPS: A progress Report. In BAUER, S. J. AND WEBER, F.K. (Eds), Proceedings Geophysical Aspects of Mass Movements, Austrian Academy of Sciences, Vienna, S. 75-88
- BRUNNER, F. K., HARTINGER, H., WIESER, A. (2000B): Zur kontinuierlichen Überwachung von Bauwerken mit GPS. In Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, TU Graz, Vol 34, S. 45-56
- BRUNNER, F. K., ZOBL, F., GASSNER, G. (2003): On the Capability of GPS for Landslide Monitoring. In Felsbau 2003, No. 2, S. 51-54



- CARDEI, M., CARDEI, I., DU, D.-Z. (HRSG.) (2005): Resource Management in Wireless Networking, Springer, Network Theory and Applications, Vol. 16, 2005, ISBN: 0-387-23807-7
- CEDERHOLM, P. (2010): Statistical characteristics of L1 carrier phase observations from four low-cost GPS receivers. In: Nordic Journal of Surveying and Real Estate Research 2000, Vol. 7, No. 1, S. 58-75
- CISCO (2003): Reference Guide Cisco Aironet Antennas and Accessories, 10/03 BW9437, Cisco Systems, Inc.
- CISCO (2006): Informationsbroschüre WLAN Antenne Cisco AIR Ant 3338, Cisco Systems, Inc.
- COSSER, E., ROBERTS, G. W., MENG, X., DODSON, A. H. (2004): Single Frequency GPS for Bridge Deflection Monitoring: Progress and Results. 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, 2004, Nottingham, England, 28. Juni – 1. Juli 2004
- DEL GROSSO, A., LANATA, F., INAUDI, D., POSENATO, D., PIERACCI, A. (2003): Breakwater deformation monitoring by automatic and remote GPS system. First International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Tokio, Japan, 13.-15. November 2003
- DIN EN ISO 9000 (2005): Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin, Beuth Verlag, 2005
- DIN EN ISO 18710-1 (2010): Ingenieurvermessung – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin, Beuth Verlag, 2010
- DIN EN ISO 18710-4 (2010): Ingenieurvermessung – Teil 4: Überwachung. DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin, Beuth Verlag, 2010
- DRESCHER (2013): Präzise und echtzeitnahe Positionierung in einem Mixmode-GPS-Netz mit großen Höhenunterschieden. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Schriftenreihe der Fachrichtung Geodäsie, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie, ISBN 978-3-935631-27-3
- DWD (2011): Deutscher Wetterdienst, Klimadaten Deutschland, Wetterstation Hamburg Fuhlsbüttel, <http://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klimadatendeutschland.html?nn=561530>
- EICHHORN, A.(2012): Monitoring: ein grundlegender Beitrag zur Überwachung von Bauwerken. In: AVN – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 4 (2012), S. 123-131

- ELMASRI, R. A., NAVATHE, S. B. (2009): Grundlagen von Datenbanksystemen. 3., aktualisierte Auflage, Pearson Studium, ISBN 978-3-86894-012-1
- ERICKSON, C. (1995): GPS Positioning Guide. Geodetic Survey Division, Geomatics Canada, Natural Resources Canada, Ottawa, ISBN 0-660-15917-1
- FELDMETH, I., JÄGER, R. UND R. ZISCHINSKY (2002): GPS-based Online Control and Alarmsystem GOCA – Leistungsstandards am Einsatzbeispiel Staumauer Kops (Vorarlberger Illwerke AG, Österreich). Wasserwirtschaft - Zeitschrift für Wasser und Umwelt (92), Vieweg Verlag, Stuttgart, ISSN 0043-0978. S. 84-99.
- FELDMETH, I., JÄGER, R. UND R. ZISCHINSKY (2003): GPS-based Online Control and Alarmsystem (GOCA) – Leistungsstandards des GOCA-Systems, praktischer Einsatz am Beispiel Staumauer Kops (Vorarlberger Illwerke AG, Österreich) und Weiterentwicklungen. (Chesi/Weinold, Hrsg.): 12. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2003. Wichmann Verlag, Heidelberg. ISBN 3-87907-401-1. S. 202-206.
- FITZEN, H.-P., BÄUMKER, M. (2009): Überwachung von Bauwerken der WSV durch kontinuierliches Precise Differential GPS. Kolloquium Ingenieurvermessung im Bauwesen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, Koblenz, 12. Februar 2009, Bundesanstalt für Gewässerkunde, gedruckte Ausgabe ISSN 1866 – 220X
- FITZEN, H.-P., BÄUMKER, M. (2006): Permanente Überwachung mit GPS - Erfahrungen und Perspektiven. Mittweidaer Talsperrentag 2006, Mittweida, 10.-11. Mai 2006
- FLOTH, M., KORTH, W. (2007): Gemeinsame Nutzung von GPS und GLONASS im Satellitenpositionierungsdienst SAPOS, Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, [https://www.geobasis-bb.de/verm\\_bb/pdf/2\\_07\\_Floth\\_67-72.pdf](https://www.geobasis-bb.de/verm_bb/pdf/2_07_Floth_67-72.pdf), 2007
- GALLEMANN, T. (2008): Geodätische Überwachung der Rutschung Aggenalm im Sudelfeld. Interner Bericht zur 8. Folgemessung am 15.10.2008, Archiv-Nr. 3476, Bayrisches Landesamt für Umwelt, München
- GLABSCH, J., HEUNECKE, O., SCHUHBÄCK, S. (2009A): Hangüberwachung mittels Low Cost GNSS im alpinen Raum - Ansätze und Erfahrungen. AHORN 2009, Zürich. 5. - 6. November 2009
- GLABSCH, J., HEUNECKE, O., SCHUHBÄCK, S. (2009B): Monitoring the Hornbergl landslide using a recently developed low cost GNSS sensor network. Journal of Applied Geodesy (JAG), Issue 4, pp. 179-192 (reviewed paper).

- GLABSCH, J., HEUNECKE, O., PINK, S., SCHUHBÄCK, S. (2010A): Nutzung von Low-Cost GNSS Empfängern für ingenieurgeodätische Überwachungsaufgaben. GNSS 2010 – Vermessung und Navigation im 21. Jahrhundert. DVW-Schriftenreihe, Band 63. S. 113-129. Wißner-Verlag, Augsburg. ISBN: 978-3-89639-787-4
- GLABSCH, J., HEUNECKE, O., SCHUHBÄCK, S. (2010B): Überwachung von Rutschhängen mittels Low-Cost GNSS Empfängern im Near Real Time Processing. In Wunderlich (ed.): Int. Kurs für Ingenieurvermessung, Munich (reviewed paper).
- GLABSCH, J., HESSE, C., HEUNECKE, O., KELLER, F., SCHUHBÄCK, S. (2011A): Permanente Überwachung eines Schiffhebewerks mit kosteneffizienten GNSS Sensoren. Vortrag im Rahmen der Geodätischen Woche 2011, Nürnberg, 29. September 2011
- GLABSCH, J., HESSE, C., HEUNECKE, O., KELLER, F., SCHUHBÄCK, S. (2011B): Kosteneffizientes Geo-Monitoring von Hochwasserschutzanlagen und Bauwerken mit GPS/GNSS Sensornetzen. Exhibition and International Conference on Climate Impact. Acqua alta, Hamburg, 11-13. Oktober 2011
- GÖRRES, B. (1996): Bestimmung von Höhenänderungen in regionalen Netzen mit dem Global Positioning System. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms- Universität, Bonn, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 461
- GÖRRES, B. (2001): Zur Kalibrierung von GPS-Antennen. In: Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik, DVW-Schriftenreihe Bd. 42, S. 206-221, 2001
- GÖRRES, B. (2010): Ist das GNSS Antennenproblem gelöst? Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Deutscher Verein für Vermessungswesen, Heft 4, 2010, 135. Jahrgang, S. 256-267, ISSN 1618-8950, Wißner, Augsburg, 2010.
- GÜNTHER, J., HEUNECKE, O., PINK, S., SCHUHBÄCK, S. (2008): Developments towards a low-cost GNSS Based Sensor Network for the Monitoring of Landslides. 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis, Lisbon, May 12 - 15 2008
- GURTNER, W., BEUTLER, G., BOTTON, S., ROTHACHER, M., GEIGER, A., KAHLE, H.-G., SCHNEIDER, D., WIGET, A. (1989): The use of the Global Positioning System in mountainous areas. Manuscripta Geodetica, 14, 53 – 60, zitiert nach ROBERT UND RIZOS (2001)
- HÄFELE, P. (2011): Untersuchungen zur Genauigkeit der mit Wasserdampfadiometern gemessenen troposphärischen Laufzeitverzögerungen sowie deren Auswirkung auf die präzise

Höhenbestimmung mit GNSS. Dissertation, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München

HANNAH, B. M. (2001): Modelling and Simulation of GPS Multipath Propagation, Ph.D. Thesis, The Cooperative Research Centre for Satellite Systems, Queensland University of Technology

HARTINGER, H., BRUNNER, F. K. (1999): Variances of GPS Phase Observations: The SIGMA- $\epsilon$  Model. GPS Solutions, Vol. 2, No. 4, pp. 35-43, John Wiley & Sons, Inc.

HARTINGER, H., BRUNNER, F. K. (2000): Development of a monitoring system of landslide motions using GPS. Proc. 9<sup>th</sup> FIG Symposium on Deformation Monitoring, Olsztyn, September 1999, S. 29 – 38, Erscheinungsjahr: 2000

HARTINGER, H. (2001): Development of a continuous deformation monitoring system using GPS. Dissertation, Technische Universität Graz, Shaker Verlag Aachen, 2001, ISBN 3-8265-9484-3

HEISE, S. (2002): Rekonstruktion dreidimensionaler Elektronendichteverteilungen basierend auf CHAMP-GPS Messungen. Dissertation, Institut für Meteorologie, Fachbereich Geowissenschaften, Freie Universität Berlin

HEUNECKE, O., KUHLMANN, H., WELSCH, W., EICHHORN, A., NEUNER, H. (2013): Handbuch Ingenieurgeodäsie - Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen, 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage 2013, Wichmann Berlin, ISBN 978-3-87907-467-9

HEUNECKE, O. (2009): Aufbau und Inhalt der neuen DIN 18710 „Ingenieurvermessung“. Ingenieurvermessung im Bauwesen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, Kolloquium am 12. Februar 2009 in Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde, S. 46-53, ISSN 1866-220X

HEUNECKE, H., SCHUHBÄCK, S., GLABSCH, J. (2011A): Bericht zum Projekt “Entwicklung, Installation und Erprobung eines GPS-gestützten online Überwachungssystems am Hornbergl, Tirol” (Jahresbericht 2010). Interner Bericht

HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H., WASLE, E. (2008): GNSS Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo & more. Springer Wien New York, ISBN 978-3-211-73012-6

HOWIND, J. (2005): Analyse des stochastischen Modells von GPS-Trägerphasenbeobachtungen. Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, (TH), Deutsche Geodätische Kommission, C-584, München 2005, ISBN 3 7696 5023 9

- IGS (2015): International GNSS Service, <https://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html> zuletzt besucht am 05.05.2015
- JANSSEN, V. (2003): A Mixed-Mode GPS Network Processing Approach for Volcano Deformation Monitoring. Dissertation, University of New South Wales, Australien
- JUNG, S. (2007): Untersuchung der Hangbewegung an der Aggenalm östlich des Sudelfelds zwischen Bayrischzell und Oberaudorf. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, München
- KÄLBER, S., JÄGER, R., SCHWÄBLE, R. (2000): A GPS-based online control and alarm system. In: GPS Solutions 2000, Vol. 3, No. 3, S. 19-25, John Wiley & Sons
- KAPLAN, E. D., HEGARTY, C. J. (2006): Understanding GPS - Principles and Applications, Second Edition, Artech House, Inc., ISBN 1-58053-894-0
- KEMPER, A., EICKLER, A. (2011): Datenbanksysteme – Eine Einführung. 8., aktualisierte und erweiterte Auflage, Oldenburg Verlag München, ISBN 978-3-486-59834-6
- KERN, FREDIE (2008): Xdesy - Programm zur Ausgleichung geodätischer Netze. [www.xdesy.de](http://www.xdesy.de), [f.kern@xdesy.de](mailto:f.kern@xdesy.de), 2008. – Freeware, Version 1.9
- KERN, FREDIE (2009): Xdesy – Benutzerhandbuch. Version 1.5.1
- KERSKEN, S. (2011): IT-Handbuch für Fachinformatiker - Der Ausbildungsbegleiter. Galileo Computing, 5., aktualisierte und erweiterte Auflage, ISBN 978-3-8362-1744-6
- KIRSCHNER H. (2006): Hornbergl – Bericht zur geologisch-geotechnischen Untersuchung Bez. Reutte Tirol/Austria. – Bericht für den Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Geologische Stelle Innsbruck
- KLOBUCHAR, J. A. (1987): Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. In: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 1987, Vol. 23, No. 3, S. 325-331, 1987
- KLOBUCHAR, J. A., KUNCHES, J. M. (2001): Eye on the Ionosphere: Correction Methods for GPS Ionospheric Range Delay. GPS Solutions, Vol. 5, No. 2, 2001, S. 91-92, John Wiley & Sons
- KLOSTIUS, R., WIESER, A., BRUNNER, F. K. (2006): Treatment of Diffraction Effects Caused By Mountain Ridges. Proc. 3rd IAG Symp. Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering / 12th FIG Symposium on Deformation Measurements

- KOHN, W., ÖZTÜRK, R. (2011): Statistik für Ökonomen, Datenanalyse mit R und SPSS, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 3. Auflage, ISBN 978-3-662-50441-3
- LANTRONIX (2006A): Informationsbroschüre Wireless Device Server, 2006, USA
- LANTRONIX (2006B): WiBox2100E User Guide, Part Number 900-351, Revision F, June 2006, USA
- LANZENDÖRFER, H. (2007): Zum Einsatz von low-cost GPS-Empfängern für kontinuierliches Monitoring eines Rutschhanges, Masterarbeit, Technische Universität Graz
- LIMPACH, P. (2009): Rock glacier monitoring with low-cost GPS: Case study at Dirru glacier, Mattertal. AHORN 2009, Zürich
- LLEWELLYN, S. K., BENT, R. B. (1973): Documentation and Description of the Bent Ionospheric Model. Report AFCRL-TR-73-0657, Air Force Cambridge Research Laboratories, Space and Missile System Organization, AD-772 733, 1973
- MANETTI, L., KNECHT, A. (2000): Permanente und autonome Erdrutschüberwachung mit GPS. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 7/2000, Band 98, S. 446-448
- MANETTI, L., GLISIC, B. (2003): Monitoring a Harbor Structure during Reinforcement using a GPS-based Monitoring System, FMGM 2003, 6th International Symposium on Field Measurements in GeoMechanics, Oslo, Norwegen, 15.-18. September 2003
- MENDES, V. B. (1999): Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques. Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 353 pp.
- MOSER, M., WUNDERLICH, T. A., MEIER, H. (2009): Kinematische Analyse der Bergzerreißung Hornbergl – Reutte (Tirol), Jahrbuch der geologischen Bundesanstalt, Band 149, Heft 1, S. 177-193, Mai 2009
- MUFFERT, M. ; ELING, C. ; KUHLMANN, H. (2009): Grundlagen der Zeitreihenanalyse im Frequenzbereich, In: Schriftenreihe DVW, Band 59, Zeitabhängige Messgrößen - Verborgene Schätze in unseren Daten, Wißner Verlag, Augsburg, ISBN 978-3-89639-732-4
- NEITZEL, F. (2010): Ausgleichsrechnung - Modellbildung, Auswertung, Qualitätsbeurteilung, In: Qualitätsmanagement geodätischer Mess- und Auswerteverfahren, Beiträge zum 93. DVW-Seminar am 10. und 11. Juni 2010 in Hannover. DVW-Schriftenreihe Band 61/2010.
- NETGEAR (2004): Informationsbroschüre Netgear WG602 Wireless Access Point, Netgear Inc., USA

- NEUNER, H., FOPPE, K. (2009): Grundlagen der Zeitreihenanalyse im Zeitbereich, In: Schriftenreihe DVW, Band 59, Zeitabhängige Messgrößen - Verborgene Schätze in unseren Daten, Wißner Verlag, Augsburg, ISBN 978-3-89639-732-4
- NEUNER, H., HEUNECKE, O. (2012): Geodätische Überwachung von Bauwerken. N. Fouad (Hrsg.): Bauphysik-Kalender 2012, Schwerpunkt: Gebäudediagnostik. Verlag Ernst & Sohn, ISBN 978-3-433-02986-2, Beitrag D7
- NIEMEIER, W. (2001): Ausgleichsrechnung, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin, ISBN 3-11-014080-2
- NOVATEL (2004): Informationsbroschüre, Smart Antenna, NovAtel Inc., Calgary Canada
- NOVATEL (2005): Superstar II Firmware Reference Manual, OM-20000086, Rev 5, NovAtel Inc., Calgary Canada
- NOVATEL (2006A): GrafNav / GrafNet User Manual, OM-20000105, Rev 1, Version 7.6, NovAtel Inc., Calgary Canada
- NOVATEL (2006B): Informationsbroschüre, Smart-V1 & Smart-V1G Antenna, NovAtel Inc., Calgary Canada
- NOVATEL (2006C): Informationsbroschüre, Waypoint GrafNav/GrafNet, NovAtel Inc., Calgary Canada
- NOVATEL (2007): OEMV Family Firmware Reference Manual, OM-20000094, Rev 5, Version 3.210, NovAtel Inc., Calgary Canada
- PARKINSON, B. W., SPILKER JR., J. J. (1996A): Global Positioning System: Theory and applications Volume 1. Progress in Astronautics and Aeronautics, Volume 163, ISBN 1-56347-106-X
- PARKINSON, B. W., SPILKER JR., J. J. (1996B): Global Positioning System: Theory and applications Volume 2. Progress in Astronautics and Aeronautics, Volume 164, ISBN 1-56347-107-8
- PINK, S. (2007): Entwicklung und Erprobung eines multifunktionalen Geo-Sensornetzwerkes für ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Schriftenreihe Studiengang Geodäsie und Geoinformation Universität der Bundeswehr München, Heft 83
- RECHENBERG, P., POMBERGER, G. (2006): Informatik Handbuch. Carl Hanser Verlag München, 4. aktualisierte und erweiterte Auflage, 2006, ISBN: 978-3-446-40185-3

- RIEDL, B. (2010): Entwicklung eines DGNSS Echtzeit-Deformationsüberwachungs-systems. Dissertation, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München
- RIZOS, C., HAN, S., GE, L., CHEN, H.-Y., HATANAKA, Y., ABE, K. (2000): Low-cost Densification of Permanent GPS Networks for Natural Hazard Mitigation: First Tests on GSI's GEONET Network. *Earth Planets Space*, Vol. 52, No. 10, S. 867-871, 2000
- RIZOS, C., HAN, S., ROBERTS, C., HAN, X., ABIDIN, H. Z., SUGANDA, O. K., WIRAKUSUMAH, A. D. (1999): Continuously Operating GPS-Based Volcano Deformation Monitoring in Indonesia: The Technical and Logistical Challenges. In: *Geodesy Beyond 2000 – The Challenges of the First Decade*, Vol. 121, S. 361-366, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 3-540-67002-5, 2000
- ROBERTS, C., RIZOS, CH. (2001): Mitigating differential troposphere effects for GPS-based volcano monitoring, *Proceedings of 5<sup>th</sup> International Symposium on Satellite Navigation Technology & Applications*, Canberra, Australia, 24-27 July
- ROBERTS, C. (2002): A Continuous low-cost GPS-based Volcano Deformation Monitoring System in Indonesia. PhD Thesis, School of Surveying and Spatial Information Systems, University of New South Wales, Australia, 2002
- ROBERTS, C., SEYNAT, C., RIZOS, C., HOOPER, G. (2004): Low-Cost Deformation Measurement System for Volcano Monitoring. 3rd FIG Regional Conference, Jakarta, Indonesia, 3.-07. Oktober 2004
- ROST, C. (2011): Phasenmehrwegereduzierung basierend auf Signalqualitätsmessungen geodätischer GNSS Empfänger. Dissertation, Technische Universität Dresden, Deutsche Geodätische Kommission, C-665, München 2011, ISBN 978-3-7696-5077-8
- ROTHACHER, M., ZEBHAUSER, B. (2000): Einführung in GPS, Tutorial zum 3. SAPOS-Symposium 2000 in München; IAPG/FESG-Schriftenreihe, Nr. 8, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, München 2000, ISBN 3-934205-07-0
- SAASTAMOINEN, J. (1973): Contributions to the theory of atmospheric refraction: Part II. Refraction corrections in satellite geodesy. In: *Bulletin Géodésique*, Vol. 107, Nr. 1, 1972, S. 13–34
- SCHWIEGER, V. (2003): Using Handheld GPS Receivers for Precise Positioning. *Proceedings on 2nd FIG Regional Conference*, Marrakesh, Marocco, 2.-5.12. 2003



- SCHWIEGER, V. (2009): Accurate High-Sensitivity GPS for Short Baselines, FIG Working Week 2009, Eilat, Israel, 03.-08.05.2009
- SCHWIEGER, V., GLÄSER, A. (2005): Possibilities of Low Cost GPS Technology for Precise Geodetic Applications. Proceedings on FIG Working Week 2005, Kairo, Ägypten, 16.-21.04.2005
- SCHWIEGER, V., ZHANG, L. (2012): Automatisches geodätisches Monitoring mit Low-Cost GNSS. Messtechnik im Bauwesen, Spezial 2012, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- SEEBER, G. (1988): Satellitengeodäsie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen , Walter de Gruyter & Co., Berlin, ISBN 3-11-010082-7
- SFC (2010): Bedienungsanleitung EYOY 600 / Efoy 900 / Efoy 1200 / Efoy 1600 / Efoy 2200, [http://www.efoy-comfort.com/sites/default/files/Bedienungsanleitung\\_EFOY\\_600\\_2200.pdf](http://www.efoy-comfort.com/sites/default/files/Bedienungsanleitung_EFOY_600_2200.pdf), SFC Energy AG
- SMITH, E. K. , JR., WEINTRAUB, S. (1953): The Constants in the Equation for Atmospheric Refractive Index at Radio Frequencies. Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 50, No. 1, Januar 1953
- SOHRABY, K., MINOLDI, D., ZNATI., T. (2007): Wireless Sensor Networks – Technology, Protocols and Applications. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ, USA, ISBN 978-0-471-74300-2
- SONNENSCHNEIN (2008): Datenblatt Solarbatterie dryfit Solar S12 / 60A, [http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/100000-124999/110787-da-01-de-Dryfit\\_Solarakku.pdf](http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/100000-124999/110787-da-01-de-Dryfit_Solarakku.pdf)
- STECA (2009): Betriebs- und Montageanleitung Steca Solarix 2401 – 4401, Version 09\_45, Steca GmbH
- STEMPFHUBER, W. (2009): Geodätische Monitoringsysteme - Stand der Technik und Abgrenzung der gegenwärtigen Systeme DVW Schriftenreihe 59/2009, Zeitabhängige Messgrößen - Verborgene Schätze in unseren Daten, Beiträge zum 85. DVW-Seminar am 7. und 8. September 2009
- SUNSET (2007): Informationsbroschüre Solarpanel AS 8005, Art.-Nr. 10002, [http://downloads.cdn.rein.de/100000-124999/110119-da-01-de-Solarmodul\\_AS\\_80.pdf](http://downloads.cdn.rein.de/100000-124999/110119-da-01-de-Solarmodul_AS_80.pdf)
- TAKASU, T., YASUDA, A. (2008): Evaluation of RTK-GPS Performance with Low-cost Single-frequency GPS Receivers. International Symposium on GPS/GNSS 2008, Tokio 2008, [http://gpspp.sakura.ne.jp/paper2005/isgps2008\\_paper\\_ttaka.pdf](http://gpspp.sakura.ne.jp/paper2005/isgps2008_paper_ttaka.pdf)

- TAKASU, T. (2010A): RTKLIB – Programm zur GNSS Positionierung, [www.rtklib.de](http://www.rtklib.de), Freeware, Version 2.4.0
- TAKASU, T. (2010B): RTKLIB ver. 2.4.0 Manual, Rev. A 2010-08-12
- THURO, K., SINGER, J., FESTL, J., WUNDERLICH, T., WASMEIER, P., REITH, C. HEUNECKE, O., GLABSCH, J., SCHUHBÄCK, S. (2011A): Entwicklung und Erprobung eines integrativen 3D-Frühwarnsystems für alpine instabile Hänge - alpEWAS. Schlußbericht zum Projekt im Rahmen des BMBF Geotechnologien Programms
- THURO, K., SINGER, J., FESTL, J., WUNDERLICH, T., WASMEIER, P., REITH, C. HEUNECKE, O., GLABSCH, J., SCHUHBÄCK, S., PLINNINGER, R., HESSE, CH. (2011B): Marktreifeentwicklung eines flexiblen, modular aufgebauten Geosensornetzwerks zur Überwachung von Hang-, Deich- und Bauwerksbewegungen – alpEWAS Markt. Schlußbericht zum Projekt im Rahmen des BMBF Geotechnologien Programms
- THUT, A. (2008): Grundbau Taschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen. Hrsg. K. J. Witt, 7. Auflage, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. Kg, Berlin, ISBN 978-3-433-01843-9
- U-BLOX (2010A): Informationsbroschüre, Lea-6T u-blox 6 GPS receiver with Precision Timing, GPS.G6-HW-09020-B1, u-blox AG
- U-BLOX (2010B): U-blox Receiver Description Including Protocol Specification, GPS.G6-SW-10018, Firmware 7.01, u-blox AG
- VOB, W. (2004): Taschenbuch der Statistik, Fachbuchverlag Leipzig, Carl Hanser Verlag München Wien, 2. Auflage, ISBN 3-446-22605-2
- WASOFT (2010A): Wa1 – Programm zur Basislinienprozessierung, [www.wasoft.de](http://www.wasoft.de), Version v2.3b
- WASOFT (2010B): User's Guide Wa1, v2.3b, September 2010
- WANNINGER, L. (2000A): Der Einfluß der Ionosphäre auf die Positionierung in Referenzstationsnetzen. In: Bayerisches Landesvermessungsamt (Hg.): 3. SAPOS-Symposium, 23./24. Mai 2000, München, S. 129-140.
- WANNINGER, L. (2000B): Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 508, 68 S., München 2000
- WANNINGER, L., FREVERT, V., WILDT, S. (2000): Der Einfluß der Signalbeugung auf die präzise Positionierung mit GPS. Zeitschrift für Vermessungswesen, 125: 8-16.

- WELLS, D. E., BECK, N., DELIKARAOGLOU, D., KLEUSBERG, A., KRAKIWSKY, E. J., LACHAPELLE, G., LANGLEY, R. B., NAKIBOGLU, M., SCHWARZ, K. P., TRANQUILLA, J. M., VANICEK, P. (1987): Guide to GPS Positioning. Canadian GPS Associates, Fredericton, New Brunswick, Canada, ISBN: 0 920 114 73 3
- WESTON, N. D., SCHWIEGER, V. (2010): Cost Effective GNSS Positioning Techniques. FIG Publication No 49, FIG Commission 5 Publication. The International Federation of Surveyors, Copenhagen, Denmark, 2010
- WIESER, A. (2002): Robust and fuzzy techniques for parameter estimation and quality assessment in GPS. Dissertation, Technische Universität Graz, Shaker Verlag, Aachen, ISBN: 978-3-8265-9807-4
- WILDT, S. (2006): Mehrwegeausbreitung bei GNSS gestützter Positionsbestimmung. Dissertation, Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Technische Universität Dresden
- WILTSCHKO, T. (2004): Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten. Dissertation, Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen, Universität Stuttgart
- WÜBBENA, G., BAGGE, A., BOETTCHE, G., SCHMITZ, M., ANDREE, P. (2001): Permanent Object Monitoring with GPS with 1 Millimeter Accuracy. International Technical Meeting ION GPS-01, Salt Lake City, USA, 11.-14. September 2001
- ZEBHAUSER, B. (2000): Zur Entwicklung eines GPS-Programmsystems für Lehre und Tests unter besonderer Berücksichtigung der Ambiguity Function Methode. Dissertation, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Technische Universität München, München
- ZHANG, L., STANGE, M., SCHWIEGER, V. (2012): Automatic low-cost GPS monitoring system using wlan communication. FIG Working Week 2012, Rome, Italy, 6.-10. May 2012
- ZHANG, L., SCHWIEGER, V. (2013A): Investigation Regarding Different Antennas Combined with Low-Cost GPS Receivers. FIG Working Week 2013, Abuja, Nigeria, 6.-10. May 2013
- ZHANG, L., SCHWIEGER, V. (2013B): Monitoring mit Low-Cost GPS Empfängern – Chancen und Grenzen. In GNSS 2013 – Schneller. Genauer. Effizienter. 124. DVW-Seminar, Karlsruhe, 14. und 15. März 2013, Wißner Verlag, Augsburg, 2013
- ZHANG, L. (2016): Qualitätssteigerung von Low-Cost-GPS Zeitreihen für Monitoring Applikationen durch zeitlich-räumliche Korrelationsanalyse. Dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie, Deutsche Geodätische Kommission, C-776, München 2016, ISBN 978-3-7696-5188-1

## 8 Web-Literaturverzeichnis

- WEB 1 [http://www.informatik.uni-oldenburg.de/~iug08/ki/Grundlagen\\_Starke\\_KI\\_vs.\\_Schwache\\_KI.html](http://www.informatik.uni-oldenburg.de/~iug08/ki/Grundlagen_Starke_KI_vs._Schwache_KI.html), zuletzt besucht am 13.12.2016
- WEB 2 [http://www.navipedia.org/index.php/GLONASS\\_Future\\_and\\_Evolutions](http://www.navipedia.org/index.php/GLONASS_Future_and_Evolutions), zuletzt besucht am 15.12.2016
- WEB 3 <https://de.wikipedia.org/wiki/Kosten-Nutzen-Analyse>, zuletzt besucht am 15.12.2016
- WEB 4: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Optimierung&oldid=50858168>, zuletzt besucht am 20.05.2015
- WEB 5: <http://de.wikipedia.org/wiki/Optimum>, zuletzt besucht am 20.05.2015
- WEB 6: <http://www.spektrum.de/lexikon/geographie/atmosphaere/542>, zuletzt besucht am 06.05.2015
- WEB 7 <http://artico.lma.fi.upm.es/numerico/miembros/antonio/async/index.html>, zuletzt besucht am 15.12.2016
- WEB 8 <https://www.lantronix.com/products/com-port-redirector/>, zuletzt besucht am 15.12.2016
- WEB 9 [http://www.markusbaumi.ch/schule/formel/dehn\\_em.pdf](http://www.markusbaumi.ch/schule/formel/dehn_em.pdf), zuletzt besucht am 13.05.2016

## 9 Abkürzungsverzeichnis

alpEWAS	Early Warning System for Alpine Slopes
ARP	Antenna Reference Point
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BL	Basislinie
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CCA	Central Control Application
CDMA	Code Division Multiple Access
CLI	Command Line Interface
CMC	Canadian Marconi Company
CODMS	Continuously Operating GPS Deformation Monitoring System
CRC	Cyclic Redundancy Check
DB	Datenbank oder Datenbasis
DBMS	Database management System
DBS	Datenbanksystem
DGNSS	Differentielles GNSS
DLL	Dynamik Link Library
DREAMS	Differential Realtime Deformation Monitoring System
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EIRP	Equivalent Isotopic Radiation Power
ERM	Entity-Relationship-Model
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FK	Foreign Key
FTP	File Transfer Protocol
GeoSN	Geo-Sensornetzwerk
GIS	Geographisches Informationssystem
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNPOM	Geodetic Navstar Permanent Object Monitoring
GNSS	Globales Navigations satellitensystem
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
GUI	Graphische Benutzeroberfläche Graphical User Interface
ICA	Ionospheric Correction Algorithm
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

IGS	International GNSS Service
IP	Internet Protocol
IRI	International Reference Ionosphere
ISTA	Institute of Space Technology and Space Applications
KI	Künstliche Intelligenz
LC	Low Cost
Lsb	least significant bit
LSB	Least Significant Byte
MAC	Media Access Control
MDS	Movement Detection System
MMS	Movement Monitoring System
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System
Msb	most significant bit
MSB	Most Signifikant Byte
NRTK	Near Realtime Kinematik
NRTP	Near Realtime Processing
NTRIP	Network Transport of RTCM Services via Internet Protocol
PCO	Phase Center Offset
PCV	Phase Center Variations
PDGNSS	präzises differentielles GNSS
PK	Primary Key
PPP	Precise Point Positioning
PPS	Puls pro Sekunde
PZ	Phasenzentrum
QZSS	Quasi-Zenit-Satelliten-System
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RJ	Registered Jack
RMS	Root Mean Square
RP-SMA	Reverse Polarity Sub-Miniature-A
RP-TNC	Reverse Polarity Threaded Neill Concelman
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime
RTK	Realtime Kinematik
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SD	Standardabweichung

SDK	Software Development Kit
SHM	Structural Health Monitoring
SMMS	Slow-Motion-Measuring-System
SNR	Signal-to-Noise-Ratio
SPP	Single Point Positioning
SQL	Structured Query Language
SSID	Service Set Identifier
SSII	Superstar II
STEC	Slant TEC
TAI	Internationale Atomzeit
TCP/IP	Transmission Control Protocol /Internet Protocol
TEC	Total Electron Control
TECU	TEC Unit
TKIP	Temporal Key Integrity Protocol
UI	User Interface
UniBwM	Universität der Bundeswehr München
USB	Universal Serial Bus
UTC	Universal Time Coordinated
VTEC	Vertikale TEC
WAAS	Wide Area Augmentation System
WEP	Wired Equivalent Privacy, Standard-Verschlüsselungsalgorithmus für WLAN
WLAN	Wireless Local Area Network
WMN	Wireless Mesh Network
WPA	Wi-Fi Protected Access

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Eingangs-, Stör- und Ausgangsgrößen eines Prozesses - links: allgemein, rechts: am Beispiel Bauwerk (NEUNER UND HEUNECKE 2012) .....	9
Abbildung 2: Notwendige Maßnahmen von Monitoring- oder Überwachungsaufgaben nach THUT (2008) und DIN 18710-4 (2010) .....	10
Abbildung 3: Prozesskette eines Monitoring-Systems .....	11
Abbildung 4: Komponenten geodätischer Monitoring-Systeme (STEMPFHUBER 2009).....	12
Abbildung 5: Absolute und relative Positionierung.....	16
Abbildung 6: Differenzenbildung beim DGNSS - Einfach-, Zweifach- und Dreifachdifferenz .....	16
Abbildung 7: Hierarchische Gliederung von Qualitätsmerkmalen (WILTSCHKO 2004).....	23
Abbildung 8: Einflussgrößen auf dem Weg vom Satellit bis hin zur Aussage über eine Bewegung ..	24
Abbildung 9: Aufbau der Atmosphäre (WEB 6) .....	26
Abbildung 10: Reflexion an horizontaler und vertikaler Reflektorebene.....	33
Abbildung 11: Gerichtete (links) und diffuse (rechts) Reflexion .....	34
Abbildung 12: Beugung an einem Hindernis.....	34
Abbildung 13: Geometrische Definition des Antennenphasenzentrums einer GNSS Antenne (GÖRRES 2001).....	37
Abbildung 14: Sinussignal mit drei Frequenzen im Orts- (links) und im Frequenzbereich (rechts) (MUFFERT ET AL. 2009) .....	44
Abbildung 15: Layout des GeoSN (GLABSCH ET AL. 2011A) .....	45
Abbildung 16: Schematischer Aufbau eines autarken Low-Cost GNSS Sensorknotens (PINK 2007)	46
Abbildung 17: Aufbau und Ablauf der Central Control Application (CCA) (GLABSCH ET AL. 2010B) .....	49
Abbildung 18: Implementierung externer Programme in der Central Control Application.....	51
Abbildung 19: Netzlayout des Testaufbaus (Kartengrundlage: Google Earth).....	61
Abbildung 20: Soll-Ist Vergleich einer Bewegung; links: Aufbau, rechts: Ergebnis (PINK 2007) .....	61
Abbildung 21: Blick von Reutte auf das Hornbergl .....	62
Abbildung 22: Netzlayout des Low-Cost GNSS Monitoring-Systems am Hornbergl .....	63
Abbildung 23: Winter- und Sommerimpressionen der Sensorknoten #1 und #2 .....	64
Abbildung 24: Hornbergl-Zeitreihen von #1 und #2 für den Zeitraum 14.07.2007-31.05.2013.....	65
Abbildung 25: Quartalsweise Bewegungsraten für Punkt #1 und #2 Zeitraum: 2007-2015.....	65
Abbildung 26: Netzlayout des Low-Cost GNSS Monitoring-Systems am Sudelfeld .....	67
Abbildung 27: Messreihen Sudelfeld Zeitraum 02.2009 – 01.2010 (THURO ET AL. 2011A) .....	68



Abbildung 28: Netzlayout des Low-Cost GNSS Monitoring-Systems am Schiffshebewerk Scharnebeck .....	69
Abbildung 29: Zeitreihen der Lagekomponenten von #101 und #103 für den Zeitraum 23.12.2010 – 28.02.2011.....	70
Abbildung 30: Tagesmitteltemperaturen Wetterstation Hamburg Fuhlsbüttel für den Zeitraum 23.12.2010 – 28.02.2011.....	71
Abbildung 31: Stundenmitteltemperaturen Wetterstation Lüneburg für die Zeiträume 13.02.2011 – 19.02.2011 (blau) und 18.04.2011 – 24.04.2011 (rot).....	71
Abbildung 32: Darstellung der Strecke #101 - #103 aus Epochenlösung und als gleitender Mittelwert L1 Norm über 11 Epochen für die Zeiträume 13.02.2011 – 19.02.2011 (blau) und 18.04.2011 – 24.04.2011 (rot) .....	72
Abbildung 33: Darstellung der Strecke #101 - #104 aus Epochenlösung und als gleitender Mittelwert L1 Norm über 11 Epochen für die Zeiträume 13.02.2011 – 19.02.2011 (blau) und 18.04.2011 – 24.04.2011 (rot) .....	72
Abbildung 34: Autokorrelationsfunktion für die Lagekomponenten von #101 vom Pilotprojekt Scharnebeck .....	72
Abbildung 35: Kreuzkorrelationsfunktion Temperatur und Lagekomponenten von #101 vom Pilotprojekt Scharnebeck (links: Rechtswert, rechts: Hochwert) .....	73
Abbildung 36: Abschattungsmasken kombiniert aus Referenzstation (rot) und Objektpunkt (blau)..	75
Abbildung 37: Vergleich der Lösungen (Rechtswerte #11 Pilotprojekt Sudelfeld) 900, 4 x 900 und 3600.....	91
Abbildung 38: Getestete Empfänger-Antennen-Kombinationen.....	93
Abbildung 39: Konvergenzverhalten einer „ungestörten“ Epoche (1445_209700; Basislinie 1000 nach 1).....	101
Abbildung 40: Konvergenzverhalten einer „gestörten“ Epoche (1445_198000; Basislinie 1000 nach 1) .....	101
Abbildung 41: Signalqualitätswerte der Epoche 1519_154800 von #2 Pilotprojekt Hornbergl .....	104

## 11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verfügbarkeiten und Genauigkeiten der IGS GNSS Ephemeriden (IGS 2015).....	25
Tabelle 2: Ionosphären Modelle mit Effizienz und Kurzbeschreibung .....	28
Tabelle 3: Unterschiede und Gemeinsamkeiten von Beugung und Multipath (WANNINGER ET AL. 2000) .....	35
Tabelle 4: Spezifikationen der für Projekteinsätze verwendeten Enclosures (NOVATEL 2004, NOVATEL 2006B).....	47
Tabelle 5: Ausgewählte WLAN Kommunikationskomponenten (LANTRONIX 2006, NETGEAR 2004, CISCO 2003, CISCO 2006) .....	48
Tabelle 6: Stromversorgungskomponenten für einen autarken Betrieb (SUNSET 2007, STECA 2009, SONNENSCHIEB 2008, SFC 2010).....	49
Tabelle 7: Proprietäre Software der verwendeten Low-Cost GNSS Empfänger (Auswahl).....	52
Tabelle 8: Interpretation eines Bytes in verschiedenen Bit-Reihenfolgen.....	54
Tabelle 9: Hexadezimalsystem – Grundzahl 16 (1 Byte) .....	54
Tabelle 10: Aufbau der Nachrichten incl. Byte-Anzahl (NOVATEL 2005, NOVATEL 2007, U-BLOX 2010B).....	56
Tabelle 11: Message ID ausgewählter Empfänger (NOVATEL 2005, NOVATEL 2007, U-BLOX 2010B) .....	56
Tabelle 12: Kenngrößen der Basislinien – Projekt Hornbergl.....	63
Tabelle 13: Vergleich von epochaler und permanenter Messung (HEUNECKE ET AL. 2011A).....	66
Tabelle 14: Statistik der Ausfalltage 2010 (HEUNECKE ET AL. 2011A).....	66
Tabelle 15: Kenngrößen der Basislinien am Sudelfeld.....	68
Tabelle 16: Kenngrößen der Basislinien am Schiffshebewerk Scharnebeck.....	70
Tabelle 17: Exemplarische Basislinienlösungen im Projektvergleich.....	74
Tabelle 18: GK Koordinaten der Objektpunkte der einzelnen Berechnungen (GPS) .....	89
Tabelle 19: GK Koordinaten der Objektpunkte der einzelnen Berechnungen (GPS & GLONASS)..	89
Tabelle 20: Standardabweichungen der einzelnen Berechnungen.....	91
Tabelle 21: Basislinienergebnisse nach Ausreißereliminierung (GPS) .....	94
Tabelle 22: Basislinienergebnisse nach Ausreißereliminierung (GPS & GLONASS) .....	95
Tabelle 23: Vergleich Auswertesoftware, nur GPS, Pilotprojekt Scharnebeck.....	98
Tabelle 24: Vergleich Auswertesoftware, nur GPS, Pilotprojekt Scharnebeck, mit Ausreißereliminierung .....	98
Tabelle 25: Vergleich Auswertesoftware, GPS & GLONASS, Pilotprojekt Scharnebeck .....	99

Tabelle 26: Vergleich Auswertesoftware, GPS & GLONASS, Pilotprojekt Scharnebeck, mit Ausreißereliminierung .....	99
Tabelle 27: Auszug GrafNav-Ergebnisdatei einer „gestörten“ Epoche (1445_198000; Basislinie 1000 nach 1).....	102
Tabelle 28: Gegenüberstellung der Prozessierungsergebnisse „standard“ vs. „optimiert“ .....	104
Tabelle 29: Auszug Tabelle gnss_obstruction, Pilotprojekt Hornbergl.....	106
Tabelle 30: Mögliche Kriterien für die Beispielepoche 1519_154800 von Punkt #2 im Pilotprojekt Hornbergl .....	108
Tabelle 31: Untersuchte Einstellungen zur Elimination weiterer Satelliten .....	109
Tabelle 32: Mittelwerte und Standardabweichungen der untersuchten Einstellungen .....	109

# Anhang A 1: Nachrichtenstruktur ausgewählter Low-Cost GNSS Empfänger

## Superstar II (nach NOVATEL 2005)

	Nr	Name	Beschreibung	Anzahl Bytes	Offset Bytes
Header	1	Start-Byte	01	1	0
	2	Message ID	(incl. continuous oder oneshot)	1	1
	3	Komplementär ID	255-ID damit eindeutig	1	2
	4	Länge der Nachricht	ohne Header und Checksumme	1	3
	5	Nachricht		x	4
	6	Checksumme	16bit (Header&Message)	2	4+x

## OEMV (nach NOVATEL 2007)

	Nr	Name	Beschreibung	Anzahl Bytes	Offset Bytes
Header	1	Start-Byte	AA4412	3	0
	2	Header Länge	(bisher immer 28 = 1C)	1	3
	3	Nachrichten-ID		2	
	4	Nachrichten-Typ		1	
	5			1	
	6	Nachrichten-Länge	(ohne Header ohne Checksumme)	2	
	7			2	
	8			1	
	9			1	
	10	GPS Woche		2	
	11	GPS Sekunde		4	
	12			4	
	13			2	
	14			2	
		Nachricht			
		Checksumme	32-Bit		

## u-blox (nach U-BLOX 2010B)

	Nr	Name	Beschreibung	Anzahl Bytes	Offset Bytes
Header	1	Start-Byte	B5 62	2	0
	2	CLASS	(Message class z.B. Nav Results)	1	2
	3	ID		1	3
	4	Nachrichten-Länge	(ohne Startbytes, Class, ID, Länge-Bytes, Checksumme)	2	4
	5	Nachricht		x	6
	6	Checksumme	(16-Bit)	2	6+x

## Anhang A 2: Verwendete Nachrichten SS II (nach NOVATEL 2005)

### 1) Ephemeris Data – Ephemeriden

Message ID: 22  
Länge: 79  
Aufruf: 01 96 69 00 00 01 (kontinuierlich)

### 2) Measurement Block Data – Rohdaten

Message ID: 23  
Länge: 29  
Aufruf: 01 97 68 01 00 01 01 (kontinuierlich)

### 3) Navigation Data (User Coordinates) – Position

Message ID: 20  
Länge: 77  
Aufruf: 01 94 6B 00 00 01 (kontinuierlich)  
Inhalt: Longitude [rad]: Offset 18, Länge 8, Typ Double  
Latitude [rad]: Offset 26, Länge 8, Typ Double  
Height [m]: Offset 34, Länge 4, Typ Float

### 4) Navigation Data (ECEF Coordinates) – Zeit

Message ID: 21  
Länge: 78  
Aufruf: 01 95 6A 00 00 01 (kontinuierlich)  
Inhalt: GPS Sekunde [s]: Offset 4, Länge 8, Typ Double  
GPS Woche: Offset 12, Länge 2, Typ Short

### 5) Satellite Visibility Data and Status – Elevation, Azimut und SNR

Message ID: 33  
Länge: 67  
Aufruf: 01 A1 5E 00 00 01 (kontinuierlich)  
Inhalt: Elevation [°]: Offset 6, Länge 1, Typ Char  
Azimut [°]: Offset: 7, Länge 1 +1bit, Typ Char  
Carrier to Noise Ratio [dB]: Offset 9, Länge 1, Typ Uchar

## Anhang A 3: Verwendete Nachrichten OEM V (nach NOVATEL 2007)

1) RXMEPHEM – Ephemeriden

Message ID: 41

2) RANGE – Rohdaten und SNR

Message ID: 43

Länge: 28+6+#obs\*44

3) BESTPOS – Positionen

Message ID: 42

Länge: 100

Inhalt: Longitude: Offset 8, Länge 8, Typ Double

Latitude: Offset 16, Länge 8, Typ Double

Height: Offset 24, Länge 8, Typ Double

4) SATVIS – Azimut und Elevation

Message ID: 48

Länge: 28+16+#Sat\*40

Inhalt: prn: Offset 12+#Sat\*40, Länge 2, Typ Short

Elevation: Offset 20+#Sat\*40, Länge 8, Typ Double

Azimut: Offset 28+#Sat\*40, Länge 8, Typ Double

5) GLOCLOCK

Message ID: 719 -> 2B00

Asynch

6) GLOEPHEMERIS

Message ID: 723

Asynch

## Anhang A 4: Verwendete Nachrichten u-blox (nach U-BLOX 2010B)

### 1) RXM-EPH – Ephemeriden

Message ID: 0231

Länge: 8 oder 104

### 2) RXM-RAW – Rohdaten und Zeit

Message ID: 0210

Länge:  $8 + \#Sat * 24$

Inhalt: GPS Sekunde: Offset 0, Länge 4, Typ i4

GPS Woche: Offset 4, Länge 2, Typ i2

Signal strength C/N0: Offset  $30 + N * 24$ , Länge 1, Typ i1

### 3) NAV-POSLH – Position

Message ID: 0102

Länge: 28

Inhalt: Longitude: Offset 4, Länge 4, Typ i4

Latitude: Offset 8, Länge 4, Typ i4

Height: Offset 12, Länge 4, Typ i4

### 4) NAV-SVINFO – Elevation, Azimut und SNR

Message ID: 0130

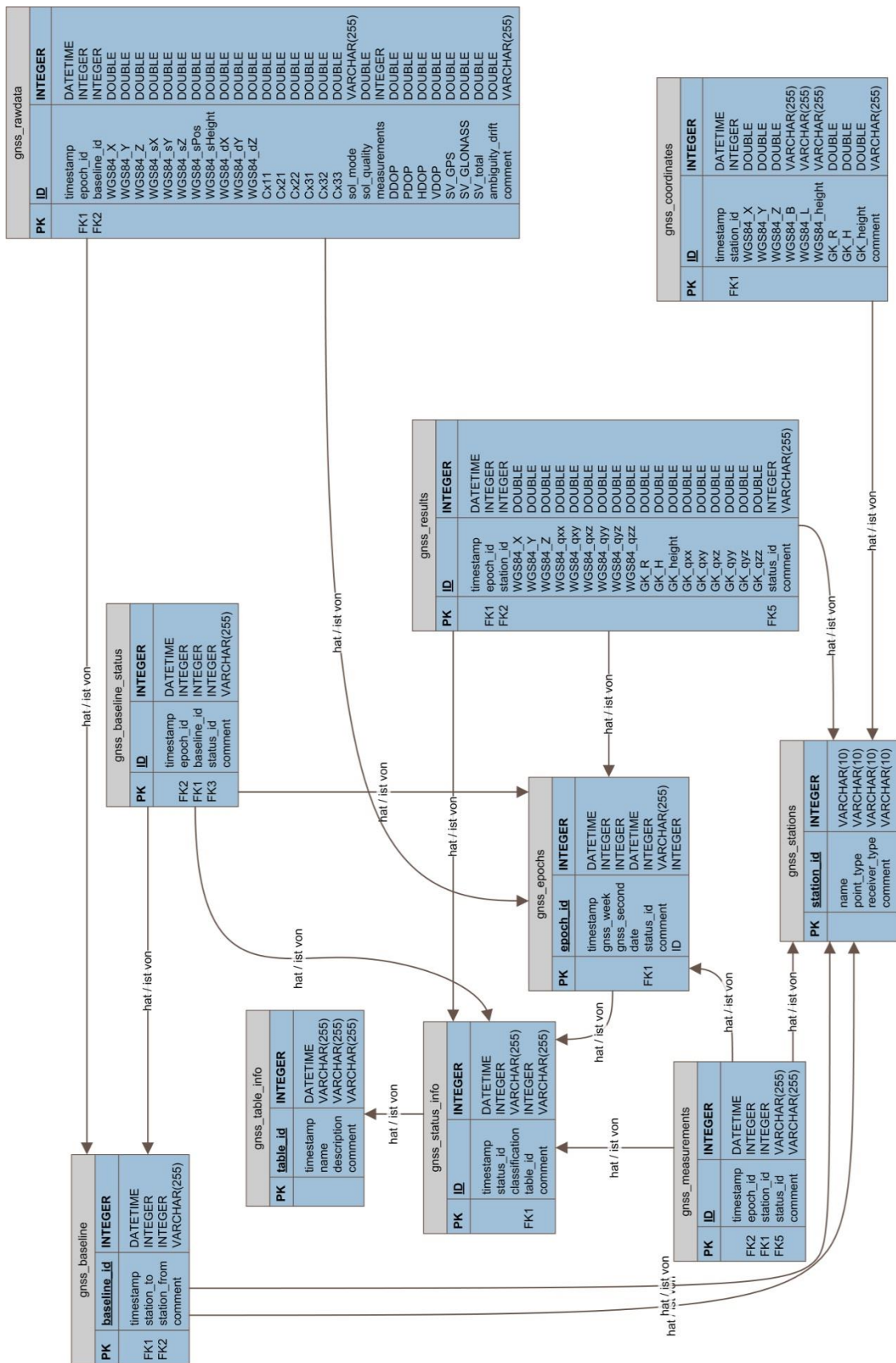
Länge:  $8 + NCH * 12$

Inhalt: Carrier to Noise Ratio: Offset  $12 + N * 12$ , Länge 1, Typ u1

Elevation: Offset  $13 + N * 12$ , Länge 1, Typ i1

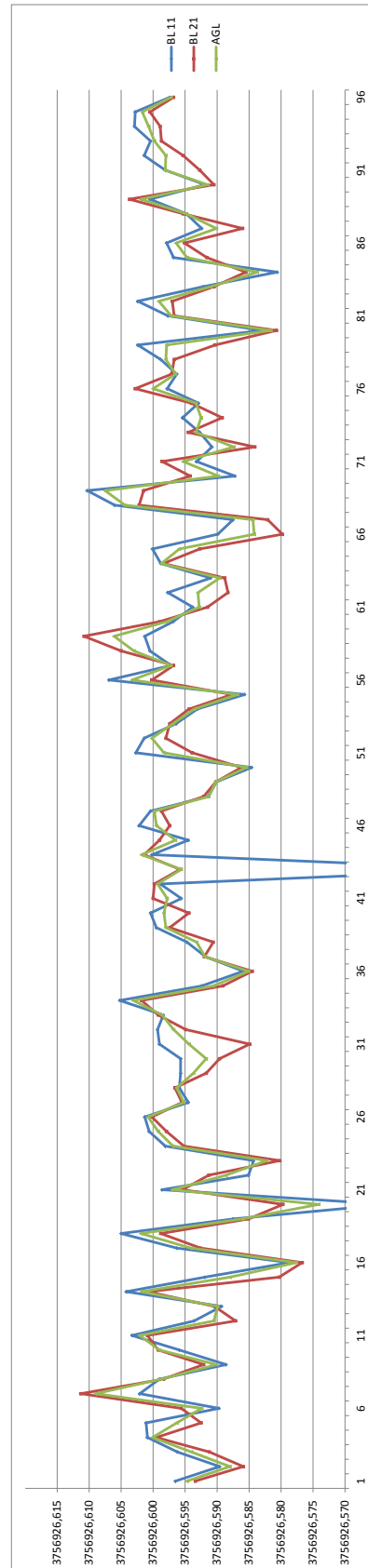
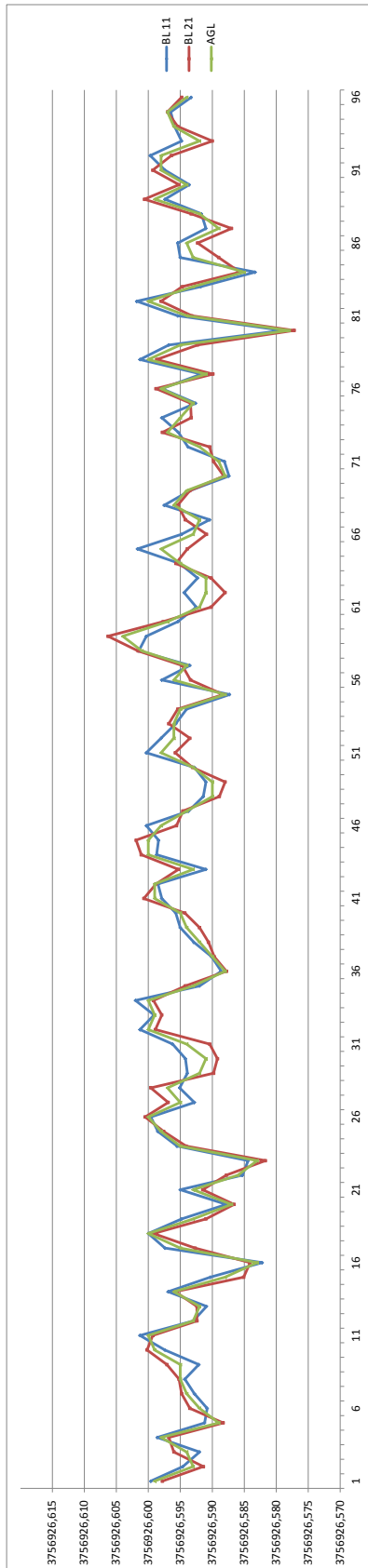
Azimut: Offset  $14 + N * 12$ , Länge 2, Typ i2

# Anhang A 5: Entity-Relationship-Modell





# Anhang A 6: Rechtswert # 101 ohne und mit Ausgleichung, Pilotprojekt Scharnebeck (oben GPS & GLONASS, unten GPS)



# Anhang A 7: Vergleich unterschiedlicher Epochenlängen, Pilotprojekt Hornbergl

BL	Lsg	$\Delta t$	#	R [m]	H [m]	Höhe [m]	$s_R$ [m]	$s_H$ [m]	$s_{Höhe}$ [m]	%
21	alle	900	3356	24177,424	5259264,496	1668,765	0,240	0,129	0,192	99,88
		1800	1680	24177,414	5259264,497	1668,766	0,174	0,085	0,132	100,00
		3600	840	24177,404	5259264,492	1668,774	0,092	0,047	0,073	100,00
		10800	280	24177,402	5259264,491	1668,779	0,014	0,008	0,021	100,00
		21600	140	24177,405	5259264,490	1668,781	0,005	0,004	0,015	100,00
		43200	70	24177,404	5259264,489	1668,780	0,003	0,002	0,014	100,00
		86400	35	24177,405	5259264,489	1668,779	0,001	0,001	0,011	100,00
	nur fixed	900	2063	24177,405	5259264,490	1668,791	0,009	0,011	0,028	61,40
		1800	1022	24177,405	5259264,490	1668,790	0,014	0,009	0,023	60,83
		3600	503	24177,404	5259264,490	1668,787	0,006	0,007	0,019	59,88
		10800	206	24177,404	5259264,490	1668,781	0,004	0,004	0,017	73,57
		21600	118	24177,405	5259264,490	1668,781	0,003	0,003	0,016	84,29
		43200	65	24177,405	5259264,489	1668,780	0,002	0,002	0,015	92,86
		86400	35	24177,405	5259264,489	1668,779	0,001	0,001	0,011	100,00
	nur high	900	1712	24177,405	5259264,490	1668,790	0,009	0,012	0,029	50,95
		1800	712	24177,405	5259264,491	1668,788	0,016	0,009	0,022	42,38
		3600	352	24177,404	5259264,491	1668,786	0,005	0,007	0,018	41,90
		10800	154	24177,404	5259264,490	1668,780	0,004	0,004	0,016	55,00
		21600	64	24177,405	5259264,490	1668,779	0,003	0,003	0,018	45,71
		43200	38	24177,405	5259264,489	1668,779	0,002	0,002	0,016	54,29
		86400	21	24177,405	5259264,489	1668,776	0,001	0,002	0,010	60,00

22	alle	900	3359	24110,139	5259291,534	1720,432	0,185	0,081	0,127	99,97
		1800	1680	24110,135	5259291,534	1720,433	0,128	0,046	0,080	100,00
		3600	840	24110,126	5259291,536	1720,435	0,067	0,026	0,046	100,00
		10800	280	24110,110	5259291,538	1720,435	0,016	0,011	0,024	100,00
		21600	140	24110,108	5259291,537	1720,437	0,004	0,003	0,016	100,00
		43200	70	24110,108	5259291,537	1720,436	0,003	0,003	0,015	100,00
		86400	35	24110,108	5259291,537	1720,436	0,003	0,002	0,012	100,00
	nur fixed	900	2263	24110,107	5259291,538	1720,444	0,008	0,011	0,027	67,35
		1800	1138	24110,107	5259291,538	1720,443	0,007	0,010	0,024	67,74
		3600	586	24110,107	5259291,537	1720,442	0,006	0,008	0,021	69,76
		10800	236	24110,108	5259291,537	1720,438	0,004	0,004	0,018	84,29
		21600	136	24110,108	5259291,537	1720,437	0,004	0,003	0,016	97,14
		43200	70	24110,108	5259291,537	1720,436	0,003	0,003	0,015	100,00
		86400	35	24110,108	5259291,537	1720,436	0,003	0,002	0,012	100,00
	nur high	900	1872	24110,107	5259291,538	1720,444	0,008	0,011	0,027	55,71
		1800	814	24110,107	5259291,538	1720,444	0,007	0,010	0,025	48,45
		3600	400	24110,107	5259291,538	1720,442	0,006	0,008	0,022	47,62
		10800	174	24110,108	5259291,538	1720,437	0,004	0,004	0,018	62,14
		21600	95	24110,109	5259291,537	1720,437	0,004	0,003	0,016	67,86
		43200	60	24110,108	5259291,537	1720,435	0,003	0,003	0,016	85,71
		86400	34	24110,108	5259291,537	1720,436	0,003	0,003	0,012	97,14

## Anhang A 8: Vergleich unterschiedlicher Epochenlängen, Pilotprojekt Sudelfeld

BL	Lsg	$\Delta t$	#	R [m]	H [m]	Höhe [m]	$s_R$ [m]	$s_H$ [m]	$s_{Höhe}$ [m]	%
11	alle	900	3359	4504350,768	5281121,121	1123,227	0,182	0,061	0,097	99,97
		1800	1680	4504350,765	5281121,127	1123,223	0,096	0,019	0,044	100,00
		3600	840	4504350,761	5281121,126	1123,223	0,013	0,016	0,021	100,00
		10800	280	4504350,761	5281121,128	1123,223	0,004	0,003	0,006	100,00
		21600	140	4504350,761	5281121,128	1123,222	0,002	0,002	0,004	100,00
		43200	70	4504350,760	5281121,128	1123,222	0,001	0,001	0,003	100,00
		86400	35	4504350,760	5281121,128	1123,222	0,001	0,001	0,002	100,00
	nur fixed	900	3147	4504350,762	5281121,126	1123,223	0,009	0,020	0,031	93,66
		1800	1574	4504350,761	5281121,127	1123,223	0,007	0,012	0,024	93,69
		3600	801	4504350,761	5281121,128	1123,222	0,005	0,006	0,014	95,36
		10800	279	4504350,761	5281121,128	1123,223	0,003	0,003	0,006	99,64
		21600	140	4504350,761	5281121,128	1123,222	0,002	0,002	0,004	100,00
		43200	70	4504350,760	5281121,128	1123,222	0,001	0,001	0,003	100,00
		86400	35	4504350,760	5281121,128	1123,222	0,001	0,001	0,002	100,00
	nur high	900	2637	4504350,762	5281121,125	1123,222	0,009	0,017	0,028	78,48
		1800	1322	4504350,761	5281121,127	1123,221	0,007	0,010	0,019	78,69
		3600	636	4504350,761	5281121,128	1123,221	0,005	0,006	0,012	75,71
		10800	269	4504350,761	5281121,128	1123,223	0,003	0,003	0,006	96,07
		21600	140	4504350,761	5281121,128	1123,222	0,002	0,002	0,004	100,00
		43200	70	4504350,760	5281121,128	1123,222	0,001	0,001	0,003	100,00
		86400	35	4504350,760	5281121,128	1123,222	0,001	0,001	0,002	100,00

12	alle	900	3355	4504482,790	5280938,593	1074,403	0,039	0,018	0,029	99,85
		1800	1678	4504482,791	5280938,593	1074,404	0,015	0,006	0,015	99,88
		3600	839	4504482,790	5280938,593	1074,405	0,002	0,003	0,005	99,88
		10800	279	4504482,791	5280938,592	1074,405	0,001	0,002	0,003	99,64
		21600	139	4504482,791	5280938,592	1074,405	0,001	0,001	0,002	99,29
		43200	69	4504482,790	5280938,592	1074,405	0,001	0,001	0,001	98,57
		86400	34	4504482,791	5280938,592	1074,405	0,001	0,001	0,001	97,14
	nur fixed	900	3190	4504482,790	5280938,592	1074,403	0,004	0,005	0,014	94,94
		1800	1638	4504482,790	5280938,592	1074,404	0,003	0,004	0,010	97,50
		3600	833	4504482,790	5280938,592	1074,405	0,002	0,002	0,005	99,17
		10800	279	4504482,791	5280938,592	1074,405	0,001	0,002	0,003	99,64
		21600	139	4504482,791	5280938,592	1074,405	0,001	0,001	0,002	99,29
		43200	69	4504482,790	5280938,592	1074,405	0,001	0,001	0,001	98,57
		86400	34	4504482,791	5280938,592	1074,405	0,001	0,001	0,001	97,14
	nur high	900	2878	4504482,790	5280938,592	1074,404	0,004	0,005	0,013	85,65
		1800	1492	4504482,790	5280938,592	1074,404	0,003	0,003	0,010	88,81
		3600	802	4504482,790	5280938,592	1074,405	0,002	0,002	0,005	95,48
		10800	279	4504482,791	5280938,592	1074,405	0,001	0,002	0,003	99,64
		21600	139	4504482,791	5280938,592	1074,405	0,001	0,001	0,002	99,29
		43200	69	4504482,790	5280938,592	1074,405	0,001	0,001	0,001	98,57
		86400	34	4504482,791	5280938,592	1074,405	0,001	0,001	0,001	97,14

BL	Lsg	$\Delta t$	#	R [m]	H [m]	Höhe [m]	$s_R$ [m]	$s_H$ [m]	$s_{Höhe}$ [m]	%
13	alle	900	3359	4504628,970	5280917,728	1017,124	0,145	0,030	0,057	99,97
		1800	1680	4504628,968	5280917,728	1017,127	0,097	0,013	0,033	100,00
		3600	840	4504628,961	5280917,728	1017,131	0,005	0,004	0,008	100,00
		10800	280	4504628,961	5280917,728	1017,131	0,001	0,002	0,003	100,00
		21600	140	4504628,960	5280917,728	1017,131	0,001	0,002	0,002	100,00
		43200	70	4504628,960	5280917,728	1017,132	0,001	0,001	0,002	100,00
		86400	35	4504628,960	5280917,728	1017,131	0,001	0,001	0,001	100,00
	nur fixed	900	3203	4504628,961	5280917,727	1017,129	0,004	0,011	0,018	95,33
		1800	1632	4504628,961	5280917,727	1017,129	0,003	0,007	0,013	97,14
		3600	831	4504628,961	5280917,728	1017,130	0,002	0,004	0,007	98,93
		10800	280	4504628,961	5280917,728	1017,131	0,001	0,002	0,003	100,00
		21600	140	4504628,960	5280917,728	1017,131	0,001	0,002	0,002	100,00
		43200	70	4504628,960	5280917,728	1017,132	0,001	0,001	0,002	100,00
		86400	35	4504628,960	5280917,728	1017,131	0,001	0,001	0,001	100,00
	nur high	900	2865	4504628,961	5280917,727	1017,128	0,004	0,010	0,018	85,27
		1800	1462	4504628,961	5280917,727	1017,129	0,003	0,006	0,013	87,02
		3600	755	4504628,961	5280917,728	1017,130	0,002	0,003	0,007	89,88
		10800	278	4504628,961	5280917,728	1017,131	0,001	0,002	0,003	99,29
		21600	140	4504628,960	5280917,728	1017,131	0,001	0,002	0,002	100,00
		43200	70	4504628,960	5280917,728	1017,132	0,001	0,001	0,002	100,00
		86400	35	4504628,960	5280917,728	1017,131	0,001	0,001	0,001	100,00

## Anhang A 9: Vergleich unterschiedlicher Epochenlängen, Pilotprojekt Scharnebeck

BL	Lsg	$\Delta t$	#	R [m]	H [m]	Höhe [m]	$s_R$ [m]	$s_H$ [m]	$s_{Höhe}$ [m]	%
11	alle	900	3349	3599287,310	5907678,424	93,382	0,022	0,010	0,030	99,67
		1800	1680	3599287,310	5907678,424	93,381	0,002	0,002	0,005	100,00
		3600	840	3599287,310	5907678,424	93,381	0,002	0,002	0,004	100,00
		10800	280	3599287,310	5907678,424	93,381	0,002	0,001	0,002	100,00
		21600	140	3599287,310	5907678,424	93,381	0,001	0,001	0,001	100,00
		43200	70	3599287,310	5907678,424	93,381	0,001	0,001	0,001	100,00
		86400	35	3599287,310	5907678,424	93,381	0,001	0,001	0,001	100,00
	nur fixed	900	3337	3599287,310	5907678,424	93,381	0,004	0,004	0,007	99,32
		1800	1680	3599287,310	5907678,424	93,381	0,002	0,002	0,005	100,00
		3600	840	3599287,310	5907678,424	93,381	0,002	0,002	0,004	100,00
		10800	280	3599287,310	5907678,424	93,381	0,002	0,001	0,002	100,00
		21600	140	3599287,310	5907678,424	93,381	0,001	0,001	0,001	100,00
		43200	70	3599287,310	5907678,424	93,381	0,001	0,001	0,001	100,00
		86400	35	3599287,310	5907678,424	93,381	0,001	0,001	0,001	100,00
	nur high	900	3291	3599287,310	5907678,424	93,381	0,003	0,003	0,007	97,95
		1800	1677	3599287,310	5907678,424	93,381	0,002	0,002	0,005	99,82
		3600	840	3599287,310	5907678,424	93,381	0,002	0,002	0,004	100,00
		10800	280	3599287,310	5907678,424	93,381	0,002	0,001	0,002	100,00
		21600	140	3599287,310	5907678,424	93,381	0,001	0,001	0,001	100,00
		43200	70	3599287,310	5907678,424	93,381	0,001	0,001	0,001	100,00
		86400	35	3599287,310	5907678,424	93,381	0,001	0,001	0,001	100,00

12	alle	900	3350	3599311,877	5907703,295	93,404	0,017	0,007	0,023	99,70
		1800	1680	3599311,877	5907703,295	93,403	0,002	0,003	0,005	100,00
		3600	840	3599311,877	5907703,295	93,403	0,002	0,002	0,004	100,00
		10800	280	3599311,877	5907703,295	93,403	0,001	0,001	0,002	100,00
		21600	140	3599311,877	5907703,295	93,403	0,001	0,001	0,002	100,00
		43200	70	3599311,877	5907703,295	93,403	0,001	0,001	0,001	100,00
		86400	35	3599311,877	5907703,295	93,403	0,001	0,001	0,001	100,00
	nur fixed	900	3339	3599311,877	5907703,295	93,403	0,003	0,004	0,007	99,38
		1800	1680	3599311,877	5907703,295	93,403	0,002	0,003	0,005	100,00
		3600	840	3599311,877	5907703,295	93,403	0,002	0,002	0,004	100,00
		10800	280	3599311,877	5907703,295	93,403	0,001	0,001	0,002	100,00
		21600	140	3599311,877	5907703,295	93,403	0,001	0,001	0,002	100,00
		43200	70	3599311,877	5907703,295	93,403	0,001	0,001	0,001	100,00
		86400	35	3599311,877	5907703,295	93,403	0,001	0,001	0,001	100,00
	nur high	900	3330	3599311,877	5907703,295	93,403	0,003	0,004	0,007	99,11
		1800	1679	3599311,877	5907703,295	93,403	0,002	0,003	0,005	99,94
		3600	840	3599311,877	5907703,295	93,403	0,002	0,002	0,004	100,00
		10800	280	3599311,877	5907703,295	93,403	0,001	0,001	0,002	100,00
		21600	140	3599311,877	5907703,295	93,403	0,001	0,001	0,002	100,00
		43200	70	3599311,877	5907703,295	93,403	0,001	0,001	0,001	100,00
		86400	35	3599311,877	5907703,295	93,403	0,001	0,001	0,001	100,00

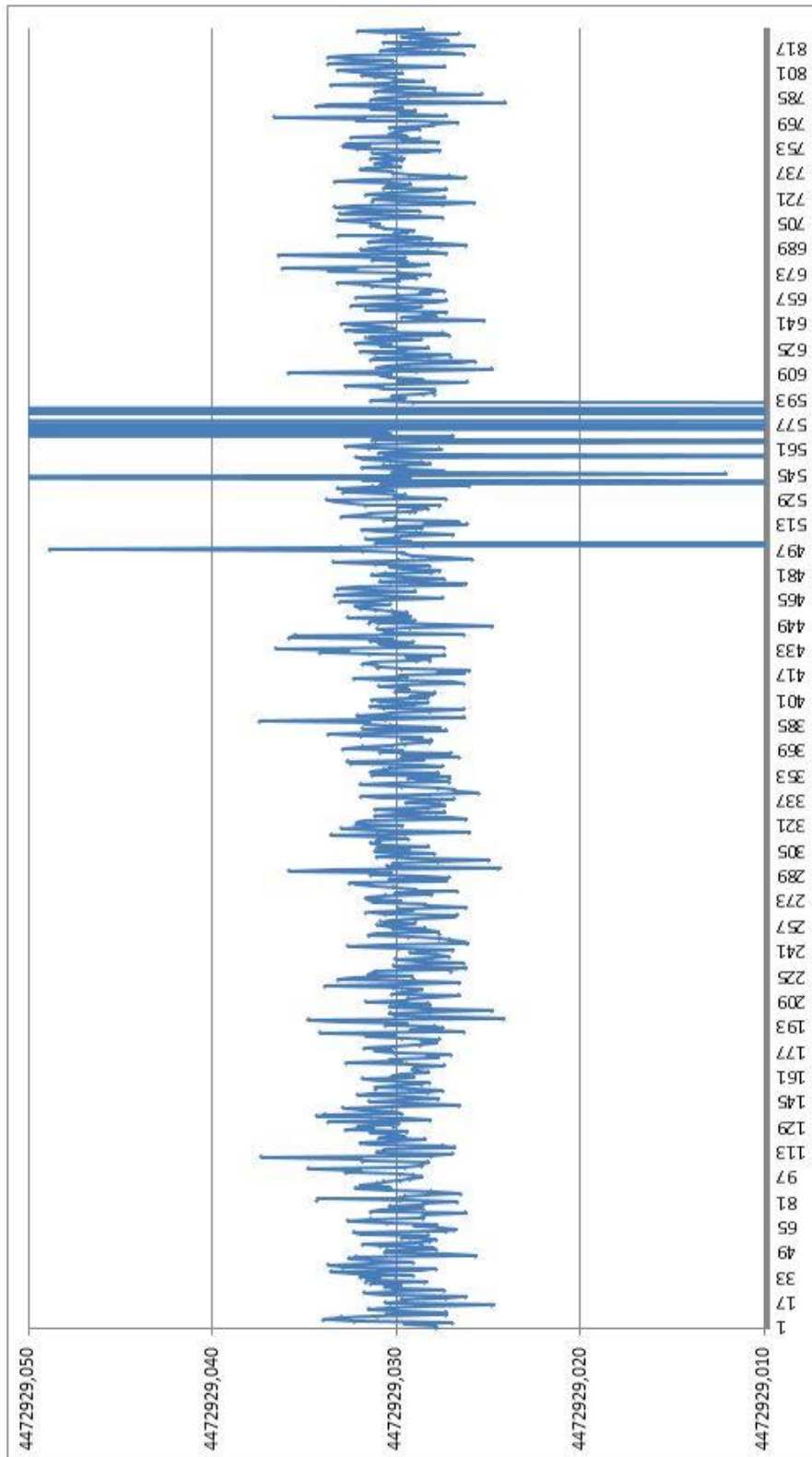
BL	Lsg	$\Delta t$	#	R [m]	H [m]	Höhe [m]	$s_R$ [m]	$s_H$ [m]	$s_{Höhe}$ [m]	%
13	alle	900	3350	3599338,751	5907674,882	93,385	0,020	0,009	0,034	99,70
		1800	1680	3599338,751	5907674,882	93,384	0,002	0,003	0,006	100,00
		3600	840	3599338,751	5907674,882	93,384	0,002	0,002	0,004	100,00
		10800	280	3599338,751	5907674,882	93,384	0,001	0,001	0,002	100,00
		21600	140	3599338,751	5907674,882	93,384	0,001	0,001	0,001	100,00
		43200	70	3599338,751	5907674,882	93,384	0,001	0,001	0,001	100,00
		86400	35	3599338,751	5907674,882	93,384	0,001	0,001	0,001	100,00
	nur fixed	900	3330	3599338,751	5907674,882	93,384	0,003	0,004	0,008	99,11
		1800	1680	3599338,751	5907674,882	93,384	0,002	0,003	0,006	100,00
		3600	840	3599338,751	5907674,882	93,384	0,002	0,002	0,004	100,00
		10800	280	3599338,751	5907674,882	93,384	0,001	0,001	0,002	100,00
		21600	140	3599338,751	5907674,882	93,384	0,001	0,001	0,001	100,00
		43200	70	3599338,751	5907674,882	93,384	0,001	0,001	0,001	100,00
		86400	35	3599338,751	5907674,882	93,384	0,001	0,001	0,001	100,00
	nur high	900	3274	3599338,751	5907674,882	93,384	0,003	0,004	0,008	97,44
		1800	1675	3599338,751	5907674,882	93,384	0,002	0,003	0,006	99,70
		3600	840	3599338,751	5907674,882	93,384	0,002	0,002	0,004	100,00
		10800	280	3599338,751	5907674,882	93,384	0,001	0,001	0,002	100,00
		21600	140	3599338,751	5907674,882	93,384	0,001	0,001	0,001	100,00
		43200	70	3599338,751	5907674,882	93,384	0,001	0,001	0,001	100,00
		86400	35	3599338,751	5907674,882	93,384	0,001	0,001	0,001	100,00

14	alle	900	3353	3599293,225	5907764,083	93,400	0,025	0,009	0,026	99,79
		1800	1680	3599293,224	5907764,083	93,399	0,002	0,003	0,005	100,00
		3600	840	3599293,224	5907764,083	93,399	0,002	0,002	0,003	100,00
		10800	280	3599293,224	5907764,083	93,399	0,002	0,001	0,002	100,00
		21600	140	3599293,224	5907764,083	93,399	0,001	0,001	0,001	100,00
		43200	70	3599293,224	5907764,083	93,399	0,001	0,001	0,001	100,00
		86400	35	3599293,224	5907764,083	93,399	0,001	0,001	0,001	100,00
	nur fixed	900	3343	3599293,224	5907764,083	93,399	0,003	0,003	0,006	99,49
		1800	1678	3599293,224	5907764,083	93,399	0,002	0,002	0,004	99,88
		3600	840	3599293,224	5907764,083	93,399	0,002	0,002	0,003	100,00
		10800	280	3599293,224	5907764,083	93,399	0,002	0,001	0,002	100,00
		21600	140	3599293,224	5907764,083	93,399	0,001	0,001	0,001	100,00
		43200	70	3599293,224	5907764,083	93,399	0,001	0,001	0,001	100,00
		86400	35	3599293,224	5907764,083	93,399	0,001	0,001	0,001	100,00
	nur high	900	3339	3599293,224	5907764,083	93,399	0,003	0,003	0,006	99,38
		1800	1677	3599293,224	5907764,083	93,399	0,002	0,002	0,004	99,82
		3600	840	3599293,224	5907764,083	93,399	0,002	0,002	0,003	100,00
		10800	280	3599293,224	5907764,083	93,399	0,002	0,001	0,002	100,00
		21600	140	3599293,224	5907764,083	93,399	0,001	0,001	0,001	100,00
		43200	70	3599293,224	5907764,083	93,399	0,001	0,001	0,001	100,00
		86400	35	3599293,224	5907764,083	93,399	0,001	0,001	0,001	100,00

## Anhang A 10: Vergleich unterschiedlicher GNSS Sensorik vor und nach Ausreißereliminierung (GPS)

		Rohdaten							Ausreißereliminierung											
		#	s <sub>R</sub> [m]	s <sub>H</sub> [m]	s <sub>Höhe</sub> [m]	R [m]	H [m]	Höhe [m]	#	s <sub>R</sub> [m]	s <sub>H</sub> [m]	s <sub>Höhe</sub> [m]	R [m]	H [m]	Höhe [m]	Änderung			Ausreißer	
																X [m]	Y [m]	Z [m]	#	%
SA V1G	658	0,0034	0,0046	0,0083	4472928,8825	5326475,7246	552,9227	658	0,0034	0,0046	0,0083	4472928,8825	5326475,7246	552,9227	0,0000	0,0000	0,0000	0	0	
	937	0,0035	0,0043	0,0084	4472928,8837	5326475,7246	552,9231	937	0,0035	0,0043	0,0084	4472928,8837	5326475,7246	552,9231	0,0000	0,0000	0,0000	0	0	
	370	0,0034	0,0046	0,0088	4472928,8838	5326475,7233	552,9243	370	0,0034	0,0046	0,0088	4472928,8838	5326475,7233	552,9243	0,0000	0,0000	0,0000	0	0	
3G+C	660	0,0021	0,0040	0,0067	4472929,0293	5326476,0372	552,9528	660	0,0021	0,0040	0,0067	4472929,0293	5326476,0372	552,9528	0,0000	0,0000	0,0000	0	0	
	368	0,0021	0,0041	0,0063	4472929,0294	5326476,0357	552,9526	368	0,0021	0,0041	0,0063	4472929,0294	5326476,0357	552,9526	0,0000	0,0000	0,0000	0	0	
	829	0,3353	0,4274	1,0672	4472929,0081	5326476,0118	553,0263	829	0,3353	0,4274	1,0672	4472929,0081	5326476,0118	553,0263	0,0217	0,0238	-0,0715	25	3,0	
Nov	937	0,0020	0,0027	0,0042	4472929,1784	5326475,5914	552,9344	937	0,0020	0,0027	0,0042	4472929,1784	5326475,5914	552,9344	0,0000	0,0000	0,0000	0	0	
	660	0,0022	0,0028	0,0045	4472929,1788	5326475,5915	552,9338	660	0,0022	0,0028	0,0045	4472929,1788	5326475,5915	552,9338	0,0000	0,0000	0,0000	0	0	
	383	0,0020	0,0026	0,0041	4472929,1783	5326475,5897	552,9352	383	0,0020	0,0026	0,0041	4472929,1783	5326475,5897	552,9352	0,0000	0,0000	0,0000	0	0	
ANN-MS	369	0,0055	0,0073	0,0135	4472928,5929	5326475,8708	552,9733	369	0,0055	0,0073	0,0135	4472928,5929	5326475,8708	552,9733	0,0000	0,0000	0,0000	0	0	
	852	0,0065	0,0081	0,0136	4472928,5926	5326475,8709	552,9729	852	0,0065	0,0081	0,0136	4472928,5926	5326475,8709	552,9729	0,0000	0,0000	0,0000	0	0	
	38	0,0059	0,0068	0,0102	4472928,5944	5326475,8712	552,9733	38	0,0059	0,0068	0,0102	4472928,5944	5326475,8712	552,9733	0,0000	0,0000	0,0000	0	0	

# Anhang A 11: Rechtswert der Kombination aus 3G+C Antenne & Lea 6T Empfänger





## Anhang A 12: Vergleich unterschiedlicher GNSS Sensorik vor und nach Ausreißereliminierung (GPS & GLONASS)

Rohdaten									
	#	s <sub>R</sub> [m]	s <sub>H</sub> [m]	s <sub>Höhe</sub> [m]	R [m]	H [m]	Höhe [m]		
SA V1G	658	0,0030	0,0037	0,0077	4472928,8826	5326475,7238	552,9246		
	936	0,0046	0,0036	0,0080	4472928,8838	5326475,7239	552,9248		
	370	0,0031	0,0039	0,0077	4472928,8839	5326475,7231	552,9256		
3G+C	660	0,0016	0,0023	0,0045	4472929,0290	5326476,0370	552,9527		
	368	0,0021	0,0041	0,0063	4472929,0294	5326476,0357	552,9526		
	829	0,3353	0,4274	1,0672	4472929,0081	5326476,0118	553,0263		
Nov	937	0,0016	0,0020	0,0034	4472929,1789	5326475,5911	552,9352		
	660	0,0022	0,0028	0,0045	4472929,1788	5326475,5915	552,9338		
	383	0,0020	0,0026	0,0041	4472929,1783	5326475,5897	552,9352		
ANN-MS	369	0,0081	0,0065	0,0127	4472928,5929	5326475,8721	552,9720		
	852	0,0065	0,0081	0,0136	4472928,5926	5326475,8709	552,9729		
	38	0,0059	0,0068	0,0102	4472928,5944	5326475,8712	552,9733		

Ausreißereliminierung												
	#	s <sub>R</sub> [m]	s <sub>H</sub> [m]	s <sub>Höhe</sub> [m]	R [m]	H [m]	Höhe [m]	Änderung			Ausreißer	
								X [m]	Y [m]	Z [m]	#	%
SA V1G	657	0,0029	0,0037	0,0074	4472928,8826	5326475,7238	552,9245	0,0000	0,0000	-0,0001	1	0
	935	0,0031	0,0034	0,0076	4472928,8839	5326475,7239	552,9249	0,0001	0,0000	0,0001	1	0
	370	0,0031	0,0039	0,0077	4472928,8839	5326475,7231	552,9256	0,0000	0,0000	0,0000	0	0
3G+C	660	0,0016	0,0023	0,0045	4472929,0290	5326476,0370	552,9527	0,0000	0,0000	0,0000	0	0
	368	0,0021	0,0041	0,0063	4472929,0294	5326476,0357	552,9526	0,0000	0,0000	0,0000	0	0
	804	0,0023	0,0040	0,0070	4472929,0299	5326476,0356	552,9548	0,0217	0,0238	-0,0715	25	3,0
Nov	937	0,0016	0,0020	0,0034	4472929,1789	5326475,5911	552,9352	0,0000	0,0000	0,0000	0	0
	660	0,0022	0,0028	0,0045	4472929,1788	5326475,5915	552,9338	0,0000	0,0000	0,0000	0	0
	383	0,0020	0,0026	0,0041	4472929,1783	5326475,5897	552,9352	0,0000	0,0000	0,0000	0	0
ANN-MS	367	0,0048	0,0063	0,0114	4472928,5934	5326475,8720	552,9717	0,0005	-0,0001	-0,0003	2	0,54
	852	0,0065	0,0081	0,0136	4472928,5926	5326475,8709	552,9729	0,0000	0,0000	0,0000	0	0
	38	0,0059	0,0068	0,0102	4472928,5944	5326475,8712	552,9733	0,0000	0,0000	0,0000	0	0

## Anhang A 13: Getestete Low-Cost GNSS Empfänger

Firma	Typ	P/N oder ähnliches	Labor	Datenanschluss	Antennen-anschluss	Strom
NovAtel	FlexG2-V1G	P/N 01018403 oder 04 NHG11240012	061595	1x Mini USB, 2x Sub D9 männlich, 1x Sub D9 weiblich	TNC Buchse	12V über Lemo
NovAtel	FlexG2-V1G	P/N 01018403 oder 04 NHG11240005	061596	1x Mini USB, 2x Sub D9 männlich, 1x Sub D9 weiblich	TNC Buchse	12V über Lemo
NovAtel	FlexG2-Star	P/N 01018509 oder 11 NHV11240004	061597	1x Mini USB, 2x Sub D9 männlich, 1x Sub D9 weiblich	TNC Buchse	12V über Lemo
NovAtel	FlexG2-Star	P/N 01018509 oder NHV11240002	061598	1x Mini USB, 2x Sub D9 männlich, 1x Sub D9 weiblich	TNC Buchse	12V über Lemo
u-blox	AEK-4T	22 6580903729 8/09 140300.0311.000	061591	1x Mini USB, 1x Sub D9 weiblich (Adapter)	SMA Buchse	5V über Mini USB
u-blox	AEK-4T	2 6580903709 8/09 140300.0311.000	061592	1x Mini USB, 1x Sub D9 weiblich (Adapter)	SMA Buchse	5V über Mini USB
u-blox	EVU-6T-0-001	21 20110200165 1/02 160400.0100.000	061593	1x Mini USB, 1x Sub D9 weiblich	SMA Buchse	5V über Mini USB
u-blox	EVU-6T-0-001	16 20104800160 0/48 160400.0100.000	061594	1x Mini USB, 1x Sub D9 weiblich	SMA Buchse	5V über Mini USB

## Anhang A 14: Getestete GNSS Antennen

Firma	Typ	P/N oder ähnliches	Labornr.	Empfänger-anschluss	Befestigung
NovAtel	GPS-701-GG	P/N 01017576 NAD11190047	061590	TNC Buchse	5/8“ Gewinde- aufnahme
NovAtel	GPS-701-GG	P/N 01017576 NAD11190049	061599	TNC Buchse	5/8“ Gewinde- aufnahme
u-blox	ANN-MS-0-005	700000.0200.005 S/N 818459	061591	SMA Stecker	-
u-blox	ANN-MS-0-005	700000.0200.005 S/N 818594	061592	SMA Stecker	-
u-blox	ANN-MS-0-005	700000.0200.005 S/N 018683	061593	SMA Stecker	-
u-blox	ANN-MS-0-005	700000.0200.005 S/N 036074	061594	SMA Stecker	-
NavXperience	3G+C	-	-	TNC Buchse	5/8“ Gewinde- aufnahme
NavXperience	3G+C	-	-	TNC Buchse	5/8“ Gewinde- aufnahme

## Anhang A 15: Getestete Enclosures

Firma	Typ	P/N oder ähnliches	Labornr.	Datenanschluss	Befestigung
NovAtel	SA SSII	NXU05360005	061575	6-polig	5/8“ Gewinde- aufnahme
NovAtel	SA SSII	NXU05360004	061576	6-polig	5/8“ Gewinde- aufnahme
NovAtel	SA V1G	NCV11170005 P/N 01018009	061604	18-polig	5/8“ Gewinde- aufnahme
NovAtel	SA V1G	NCV11170006 P/N 01018009	061603	18-polig	5/8“ Gewinde- aufnahme

# Anhang A 16: Vergleich unterschiedlicher Basislinienprozessoren, Pilotprojekt Hornbergl

		Rohdaten						
		#	s <sub>x</sub> [m]	s <sub>y</sub> [m]	s <sub>z</sub> [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
BSL 11	Wa1	672	0,1716	0,2329	0,0884	4245876,3928	798715,4719	4678631,9493
	RTKLIB	672	0,2549	0,3386	0,1031	4245876,4297	798715,5530	4678632,0068
	GrafNav	664	0,5581	0,8066	0,2476	4245876,3876	798715,5801	4678631,9699
BSL 12	Wa1	672	0,2030	0,2847	0,1462	4245903,4127	798651,9378	4678688,7135
	RTKLIB	672	0,2048	0,3242	0,0888	4245903,4403	798652,0921	4678688,7336
	GrafNav	671	0,6396	0,5208	0,5905	4245903,4024	798652,0438	4678688,6778
BSL 21	Wa1	670	0,1867	0,2195	0,0879	4245876,3762	798715,5021	4678631,9066
	RTKLIB	670	0,1918	0,2219	0,0812	4245876,4498	798715,4796	4678631,9613
	GrafNav	670	0,2002	0,1882	0,1090	4245876,3938	798715,4890	4678631,9335
BSL 22	Wa1	669	0,1818	0,2567	0,1902	4245903,3423	798652,1181	4678688,5246
	RTKLIB	671	0,1555	0,1566	0,0577	4245903,3844	798652,2046	4678688,5324
	GrafNav	670	0,1500	0,1677	0,0715	4245903,3519	798652,1727	4678688,5046

		Ausreißereliminierung						Änderung			Ausreißer		
		#	s <sub>x</sub> [m]	s <sub>y</sub> [m]	s <sub>z</sub> [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	#	%
BSL 11	Wa1	452	0,0274	0,0220	0,0280	4245876,3896	798715,4620	4678631,9513	0,0032	0,0100	-0,0020	220	32,7
	RTKLIB	328	0,0235	0,0180	0,0224	4245876,4271	798715,4675	4678631,9881	0,0026	0,0855	0,0187	344	51,2
	GrafNav	434	0,0199	0,0105	0,0289	4245876,4099	798715,4643	4678631,9692	-0,0223	0,1158	0,0006	230	34,6
BSL 12	Wa1	160	0,0502	0,0462	0,0391	4245903,3670	798651,9462	4678688,6727	0,0457	-0,0084	0,0408	512	76,2
	RTKLIB	294	0,0257	0,0197	0,0236	4245903,4257	798651,9593	4678688,7246	0,0146	0,1328	0,0090	378	56,3
	GrafNav	442	0,0215	0,0101	0,0229	4245903,4102	798651,9563	4678688,7074	-0,0078	0,0875	-0,0296	229	34,1
BSL 21	Wa1	412	0,0249	0,0244	0,0247	4245876,3674	798715,4884	4678631,8973	0,0088	0,0137	0,0093	258	38,5
	RTKLIB	447	0,0181	0,0159	0,0173	4245876,4089	798715,4986	4678631,9420	0,0409	-0,0190	0,0193	223	33,3
	GrafNav	542	0,0160	0,0099	0,0142	4245876,3857	798715,4953	4678631,9194	0,0080	-0,0063	0,0141	128	19,1
BSL 22	Wa1	255	0,0452	0,0466	0,0338	4245903,3106	798652,1469	4678688,4663	0,0318	-0,0288	0,0584	414	61,9
	RTKLIB	465	0,0205	0,0153	0,0168	4245903,3613	798652,1555	4678688,5208	0,0231	0,0492	0,0116	206	30,7
	GrafNav	595	0,0158	0,0085	0,0125	4245903,3416	798652,1526	4678688,4975	0,0103	0,0202	0,0071	75	11,2

## Anhang A 17: Vergleich unterschiedlicher Kriterien für eine optimierte signalstärkenbasierte Prozessierung

vor der Ausreißereliminierung								
	BL	#	R [m]	H [m]	h [m]	s <sub>R</sub> [m]	s <sub>H</sub> [m]	s <sub>h</sub> [m]
D <sub>0</sub>	11	657	24177,2533	5259264,6613	1667,1717	0,3751	0,1963	0,6928
D <sub>1</sub>	11	553	24177,2217	5259264,6693	1667,1729	0,5494	0,2294	0,7887
D <sub>2</sub>	11	570	24177,2185	5259264,6724	1667,1589	0,5238	0,3538	0,8820
D <sub>3</sub>	11	524	24177,2167	5259264,6702	1667,1248	0,5437	0,3583	0,5947
D <sub>4</sub>	11	587	24177,2494	5259264,6790	1667,1429	0,5680	0,3630	0,9053
D <sub>5</sub>	11	587	24177,2494	5259264,6790	1667,1429	0,5680	0,3630	0,9053
D <sub>6</sub>	11	584	24177,2483	5259264,6816	1667,1353	0,5680	0,3618	0,9069
D <sub>0</sub>	12	671	24109,8167	5259291,7972	1718,8871	0,5309	0,2701	0,9284
D <sub>1</sub>	12	613	24109,8066	5259291,8067	1718,8699	0,6602	0,3301	1,0416
D <sub>2</sub>	12	605	24109,8120	5259291,7884	1718,9157	0,5184	0,2402	0,5926
D <sub>3</sub>	12	566	24109,8013	5259291,7914	1718,8597	0,6546	0,2498	1,0846
D <sub>4</sub>	12	623	24109,8041	5259291,7979	1718,8866	0,6255	0,2632	1,0319
D <sub>5</sub>	12	621	24109,8081	5259291,7975	1718,8883	0,6186	0,2633	1,0327
D <sub>6</sub>	12	623	24109,8025	5259291,7986	1718,8863	0,6256	0,2634	1,0320

nach der Ausreißereliminierung								
	BL	#	R [m]	H [m]	h [m]	s <sub>R</sub> [m]	s <sub>H</sub> [m]	s <sub>h</sub> [m]
D <sub>0</sub>	11	476	24177,2406	5259264,6555	1667,1541	0,0119	0,0089	0,0215
D <sub>1</sub>	11	352	24177,2386	5259264,6538	1667,1569	0,0079	0,0110	0,0213
D <sub>2</sub>	11	393	24177,2389	5259264,6548	1667,1568	0,0093	0,0121	0,0222
D <sub>3</sub>	11	347	24177,2386	5259264,6538	1667,1574	0,0096	0,0142	0,0238
D <sub>4</sub>	11	418	24177,2387	5259264,6540	1667,1549	0,0079	0,0114	0,0217
D <sub>5</sub>	11	418	24177,2387	5259264,6540	1667,1549	0,0079	0,0114	0,0217
D <sub>6</sub>	11	412	24177,2387	5259264,6542	1667,1552	0,0078	0,0108	0,0213
D <sub>0</sub>	12	519	24109,7946	5259291,7929	1718,9257	0,0079	0,0098	0,0208
D <sub>1</sub>	12	426	24109,7915	5259291,7936	1718,9266	0,0055	0,0097	0,0196
D <sub>2</sub>	12	444	24109,7917	5259291,7933	1718,9272	0,0057	0,0100	0,0196
D <sub>3</sub>	12	402	24109,7917	5259291,7934	1718,9260	0,0057	0,0100	0,0189
D <sub>4</sub>	12	468	24109,7920	5259291,7937	1718,9266	0,0068	0,0098	0,0194
D <sub>5</sub>	12	467	24109,7920	5259291,7937	1718,9267	0,0068	0,0098	0,0193
D <sub>6</sub>	12	467	24109,7919	5259291,7936	1718,9265	0,0068	0,0100	0,0195

## Lebenslauf

### Persönliche Daten:

Name: Jessica Glabsch, geb. Günther  
Geboren am: 22.04.1980  
Geburtsort: Berlin  
Familienstand: verheiratet mit Stefan Glabsch  
Kinder: Adrian und Elias Glabsch

### Tätigkeiten:

seit 09.2015 Sachbearbeiterin Vermessung/Grafik, Landeskriminalamt Berlin,  
Kriminaltechnisches Institut  
07.2006 – 06.2015 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Geodäsie der  
Universität der Bundeswehr München  
Zwischenzeitlich:  
01.2014 – 10.2014 Elternzeit (Kind 2)  
12.2009 – 10.2010 Elternzeit (Kind 1)  
03.2004 – 06.2006 Studentische Hilfskraft am Institut für Geodäsie und  
Geoinformationstechnik an der Technischen Universität Berlin  
03.2005 – 08.2005 Diplomandin beim Vermessungsbüro ARC-Berlin  
Einsatz auf dem Bauvorhaben „Berlin Hauptbahnhof – Lehrter  
Bahnhof“  
2000 / 2001 Praktikantin beim Vermessungsbüro ARC-Berlin für 3 Monate

### Ausbildung:

10.1999 – 04.2006 Studium, Geodäsie und Geoinformationstechnik, Technische  
Universität Berlin  
1992 – 1999 Abitur, Albert-Einstein-Oberschule (Gymnasium) Berlin  
1986 – 1992 Grundschule Berlin

## Dank

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank nachstehenden Personen entgegen bringen, ohne deren Mithilfe die Anfertigung dieser Promotionsschrift niemals zustande gekommen wäre.

Mein besonderer Dank gilt zunächst Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke, meinem Doktorvater, für die Betreuung dieser Arbeit, der freundlichen Hilfe, dem Vertrauen und letztendlich auch der Motivation.

Als nächstes bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schwieger für die Übernahme des Koreferates. Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Lambert Wanninger für das kostenfreie zur Verfügung stellen der Software Wa1 und Herrn Dipl.-Ing. Dirk Kowalewski (Firma NavXperience) für die Leihgabe der 3G+C Antennen.

Ferner gilt mein Dank allen Projektbeteiligten der Pilotprojekte, ohne die es diese Projekte nicht gegeben hätte. Hierbei insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Christian Ihnenberger (Wildbach und Lawinenverbauung Außerfern, Lechaschau) und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wunderlich (Lehrstuhl für Geodäsie der TU München), die das Projekt Hornbergl erst ermöglicht haben. Dank auch dem Team alpEWAS, der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung in Scharnebeck sowie Herrn Dr.-Ing. Christian Hesse von dem Büro Dr. Hesse und Partner Ingenieure (dhp:i).

Mein außerordentlicher Dank gilt meinem ehemaligen Kollegen, Herrn Dipl.-Ing. Stefan Schuhbäck, der nicht nur während unserer Zugehörigkeit am Institut für Geodäsie in Neubiberg, sondern auch danach mit seiner kritischen Betrachtung, seinem moralischen Beistand und den zahlreichen Diskussionen sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Die betreuten Pilotprojekte waren unser „gemeinsames Baby“.

Zuletzt danke ich meiner Familie für die Unterstützung in einer langen und nicht gerade einfachen Zeit.

# Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München

Bisher erschienene Hefte:

Heft 1/1978 (vergriffen)

*Schödlbauer, Albert (Bearb.):* Curriculum für den wissenschaftlichen Studiengang Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr München. 53 S.

Heft 2/1978

*Chrzanowski, Adam / Dorrer, Egon (Hrsg.):* Proceedings „Standards and Specifications for Integrated Surveying and Mapping Systems“. Workshop held in Munich, Federal Republic of Germany, 1-2 June, 1977. Assisted by *J. McLaughlin*. VII, 181 S.

Heft 3/1978

*Caspary, Wilhelm / Geiger, Axel:* Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit elektronischer Neigungsmesser. 62 S.

Heft 4/1979

*Baumann, Eberhard / Caspary, Wilhelm / Dupraz, Hubert / Niemeier, Wolfgang / Pelzer, Hans / Kuntz, Eugen / Schmitt, Günter / Welsch, Walter:* Seminar über Deformationsanalysen, gehalten an der Hochschule der Bundeswehr München. 106 S.

Heft 5/1981

*Torlegård, Kennert:* Accuracy Improvement in Close Range Photogrammetry. 68 S.

Heft 6/1982

*Caspary, Wilhelm / Welsch, Walter (Hrsg.):* Beiträge zur großräumigen Neutrassierung. 271 S.

Heft 7/1982

*Borre, Kai / Welsch, Walter M. (Hrsg.):* International Federation of Surveyors – FIG. Proceedings „Survey Control Networks“. Meeting of Study Group 5B, 7th-9th July, 1982, Aalborg University Centre, Denmark. 431 S.

Heft 8/1982

*Geiger, Axel:* Entwicklung und Erprobung eines Präzisionsneigungstisches zur Kalibrierung geodätischer Instrumente. Dissertation. 125 S.

Heft 9/1983

*Welsch, Walter (Hrsg.):* Deformationsanalysen '83. Geometrische Analyse und Interpretation von Deformationen Geodätischer Netze. Beiträge zum Geodätischen Seminar 22. April 1983. 339 S.

Heft 10/1984

*Caspary, Wilhelm / Schödlbauer, Albert / Welsch,*

*Walter (Hrsg.):* 10 Jahre Hochschule der Bundeswehr München. Beiträge aus dem Institut für Geodäsie. 244 S.

Heft 11/1984 (vergriffen)

*Caspary, Wilhelm / Heister, Hansbert (Hrsg.):* Elektrooptische Präzisionsstreckenmessung. Beiträge zum Geodätischen Seminar 23. September 1983. 270 S.

Heft 12/1984

*Schwintzer, Peter:* Analyse geodätisch gemessener Punktlageänderungen mit gemischten Modellen. Dissertation. 159 S.

Heft 13/1984

*Oberholzer, Gustav:* Landespflege in der Flurbereinigung. 81 S.

Heft 14/1984

*Neukum, Gerhard:* Fernerkundung der Planeten und kartographische Ergebnisse. Mit Beiträgen von *G. Neugebauer*. Herausgegeben von *G. Neugebauer*. 102 S.

Heft 15/1984

*Schödlbauer, Albert / Welsch, Walter (Hrsg.):* Satelliten-Doppler-Messungen. Beiträge zum Geodätischen Seminar 24./25. September 1984. 396 S.

Heft 16/1985 (vergriffen)

*Szacherska, Maria Krystyna / Welsch, Walter M.:* Geodetic Education in Europe. 234 S.

Heft 17/1986

*Eissfeller, Bernd / Hein, Günter W.:* A Contribution to 3d-Operational Geodesy. Part 4: The Observation Equations of Satellite Geodesy in the Model of Integrated Geodesy. 190 S.

Heft 18/1985

*Oberholzer, Gustav:* Landespflege in der Flurbereinigung, Teil II. 116 S.

Heft 19/1986 (vergriffen)

*Landau, Herbert / Eissfeller, Bernd / Hein, Günter W.:* GPS Research 1985 at the Institute of Astronomical and Physical Geodesy. 210 S.

Heft 20/1985

Heft 20-1

*Welsch, Walter / Lapine, Lewis A. (Hrsg.):* International Federation of Surveyors – FIG. Proceedings „Inertial, Doppler and GPS Measurements for



National and Engineering Surveys“. Joint Meeting of Study Groups 5B and 5C, July 1-3, 1985. Band 1. 310 S.

Heft 20-2

*Welsch, Walter / Lapine, Lewis A. (Hrsg.):* International Federation of Surveyors – FIG. Proceedings „Inertial, Doppler and GPS Measurements for National and Engineering Surveys“. Joint Meeting of Study Groups 5B and 5C, July 1-3, 1985. Band 2. S. 311 - 634.

Heft 21/1986

*Oberholzer, Gustav:* Landespflege in der Flurbereinigung, Teil III. 100 S.

Heft 22/1987

*Caspary, Wilhelm / Hein, Günter W. / Schödlbauer, Albert (Hrsg.):* Beiträge zur Inertialgeodäsie. Geodätisches Seminar 25./26. September 1986. 386 S.

Heft 23/1987

*Dorrer, Egon / Peipe, Jürgen (Hrsg.):* Motografie. Symposium 11./12. März 1986. 285 S.

Heft 24/1987

*Neugebauer, Gustav (Hrsg.):* Brenta-Monographie – Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Hochgebirgskartographie. Mit Beiträgen von *D. Beineke, H. C. Berann, W. de Concini, G. Hell, D. Herm, H. Immel, U. Kleim, G. Neugebauer und K. Ringle.* 187 S.

Heft 25/1987

*Perelmuter, Avraam:* Beiträge zur Ausgleichung geodätischer Netze. 75 S.

Heft 26/1987

*Ellmer, Wilfried:* Untersuchung temperaturinduzierter Höhenänderungen eines Großturbinentisches. Dissertation. 109 S.

Heft 27/1988

*Heister, Hansbert:* Zur automatischen Kalibrierung geodätischer Längenmeßinstrumente. Habilitationsschrift. 213 S.

Heft 28/1987

*Paßberger, Ernst H.:* Systemstudie zur Sicherung ökologischer Vorrangflächen mittels Bodenordnung in Bayern / System study for the protection of ecological priority areas by means of Land rearrangement in Bavaria. Dissertation. 186 S.

Heft 29/1987

*Glasmacher, Hans:* Die Gaußsche Ellipsoid-Abbildung mit komplexer Arithmetik und numerischen Näherungsverfahren. Dissertation. 131 S.

Heft 30/1987

*Zhang, Yan:* Beiträge zum Entwurf von optimalen Beobachtungsplänen für tektonische Überwachungsnetze. Dissertation. 151 S.

Heft 31/1988

*Lechner, Wolfgang:* Untersuchung einer kreiselorientierten Landfahrzeug-Navigationsanlage im Hinblick auf geodätische Anwendungen und Möglichkeiten der Höhenübertragung. Dissertation. 165 S.

Heft 32/1988

*König, Rolf:* Zur Fehlertheorie und Ausgleichung inertialer Positionsbestimmungen. Dissertation. 143 S.

Heft 33/1988

*Borutta, Harald:* Robuste Schätzverfahren für geodätische Anwendungen. Dissertation. 161 S.

Heft 34/1988

*Landau, Herbert / Hehl, Klaus / Eissfeller, Bernd / Hein, Günter W. / Reilly, Ian W.:* Operational Geodesy Software Packages. 325 S.

Heft 35/1988

*Oberholzer, Gustav / Paßberger, Ernst:* Landespflege in der Flurbereinigung, Teil IV. 153 S.

Heft 36/1988

*Landau, Herbert:* Zur Nutzung des Global Positioning Systems in Geodäsie und Geodynamik: Modellbildung, Softwareentwicklung und Analyse. Dissertation. 287 S.

Heft 37/1989

*Eissfeller, Bernd:* Analyse einer geodätischen raumstabilisierten Inertialplattform und Integration mit GPS. Dissertation. 327 S.

Heft 38/1990 (*vergriffen*)

Heft 38-1

*Schödlbauer, Albert (Hrsg.):* Moderne Verfahren der Landesvermessung. Beiträge zum 22. DVW-Seminar 12.-14. April 1989. Teil I: Global Positioning System. 352 S.

Heft 38-2

*Schödlbauer, Albert (Hrsg.):* Moderne Verfahren der Landesvermessung. Beiträge zum 22. DVW-Seminar 12.-14. April 1989. Teil II: Nivellement. Teil III: Vermessungskreisel. S. 353 - 551.

Heft 39/1989

*Kersting, Norbert / Welsch, Walter (Hrsg.):* Rezente Krustenbewegungen. Seminar 8./9. Juni 1989. 307 S.

Heft 40/1989

*Oberholzer, Gustav:* Ländliche Kulturgeschichte und Landentwicklung. 214 S.

Heft 41/1990

*Hein, Günter W. / Hehl, Klaus / Eissfeller, Bernd / Ertel, Michael / Jacoby, Wolfgang / Czerek, Dirk:* On Gravity Prediction Using Density and Seismic Data. 148 S.

Heft 42/1992

*Kersting, Norbert:* Zur Analyse rezenter Krustenbewe-

gungen bei Vorliegen seismotektonischer Dislokationen. Dissertation. V, 246 S.

Heft 43/1992

*Hehl, Klaus:* Bestimmung von Beschleunigungen auf einem bewegten Träger durch GPS und digitale Filterung. Dissertation. XII, 206 S.

Heft 44/1992

*Oswald, Wolfgang:* Zur kombinierten Ausgleichung heterogener Beobachtungen in hybriden Netzen. Dissertation. 128 S.

Heft 45/1993

*Institut für Geodäsie (Hrsg.):* Das Global Positioning System im praktischen Einsatz der Landes- und Ingenieurvermessung. Beiträge zum Geodätischen Seminar 12.-14. Mai 1993. 314 S.

Heft 46/1994

*Brunner, Kurt / Peipe, Jürgen (Hrsg.):* Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer zum 60. Geburtstag. 254 S.

Heft 47/1994

Heft 47-1

*Thiemann, Karl-Heinz:* Die Renaturierung strukturarmer Intensivagrargebiete in der Flurbereinigung aus ökologischer und rechtlicher Sicht. Dissertation. Teil I: Renaturierungsleitbild, Naturschutzverfahren. XXXVI, 384 S.

Heft 47-2

*Thiemann, Karl-Heinz:* Die Renaturierung strukturarmer Intensivagrargebiete in der Flurbereinigung aus ökologischer und rechtlicher Sicht. Dissertation. Teil II: Planungsrechtliche Aspekte. XXXVI, S. 385 - 572.

Heft 48/1994

*Schwartz, Christian:* Experimente zur GPS-gestützten Aerotriangulation unter besonderer Berücksichtigung systematischer Einflüsse. Dissertation. VIII, 192 S.

Heft 49/1995

*Scheuring, Robert:* Zur Qualität der Basisdaten von Landinformationssystemen. Dissertation. 126 S.

Heft 50/1997

*Welsch, Walter M. / Lang, Martin / Miller, Maynard M. (Hrsg.):* Geodetic Activities, Juneau Icefield, Alaska, 1981-1996. 268 S.

Heft 51/1996

*Blomenhofer, Helmut:* Untersuchungen zu hochpräzisen kinematischen DGPS-Echtzeitverfahren mit besonderer Berücksichtigung atmosphärischer Fehlereinflüsse. Dissertation. X, 168 S.

Heft 52/1997

*Wang, Jian Guo:* Filtermethoden zur fehlertoleranten kinematischen Positionsbestimmung. Dissertation. XV, 138 S.

Heft 53/1996

*Chen, Guoping:* Robuste Verfahren zur Analyse linearer stochastischer Prozesse im Zeitbereich. Dissertation. III, 128 S.

Heft 54/1997

*Dold, Jürgen:* Ein hybrides photogrammetrisches Industriemeßsystem höchster Genauigkeit und seine Überprüfung. Dissertation. 140 S.

Heft 55/1997

*Eissfeller, Bernd:* Ein dynamisches Fehlermodell für GPS Autokorrelationsempfänger. Habilitationsschrift. XII, 182 S.

Heft 56/1997

*Sutor, Thomas:* Robuste Verfahren zur Analyse linearer stochastischer Prozesse im Spektralbereich. Dissertation. 123 S.

Heft 57/1997

*Oberholzer, Gustav:* Ländliche Kulturgeschichte und Landentwicklung, Teil II. 186 S.

Heft 58/1997

*Zhong, Detang:* Datumsprobleme und stochastische Aspekte beim GPS-Nivellement für lokale Ingenieurnetze. Dissertation. 160 S.

Heft 59/1997

*Jiang, Ting:* Digitale Bildzuordnung mittels Wavelet-Transformation. Dissertation. II, 136 S.

Heft 60/2000

Heft 60-1

*Caspary, Wilhelm / Heister, Hansbert / Schödlbauer, Albert / Welsch, Walter (Hrsg.):* 25 Jahre Institut für Geodäsie. Teil 1: Wissenschaftliche Beiträge und Berichte. 331 S.

Heft 60-2

*Caspary, Wilhelm / Heister, Hansbert / Schödlbauer, Albert / Welsch, Walter (Hrsg.):* 25 Jahre Institut für Geodäsie. Teil 2: Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen. 113 S.

Heft 60-3

*Caspary, Wilhelm / Heister, Hansbert / Schödlbauer, Albert / Welsch, Walter (Hrsg.):* 25 Jahre Institut für Geodäsie. Teil 3: Aus dem Leben des Instituts. 149 S.

Heft 61/1998

*Cui, Tiejun:* Generierung hochwertiger Digitaler Geländemodelle aus analogen Karten mittels Mathematischer Morphologie. Dissertation. 188 S.

Heft 62/1999

*Brunner, Kurt / Welsch, Walter M. (Hrsg.):* Hochgebirgs- und Gletscherforschung. Zum 100. Geburtstag von Richard Finsterwalder. 114 S.

Heft 63/1999

*Fosu, Collins:* Astrogeodetic Levelling by the Combination of GPS and CCD Zenith Camera. Dissertation. 155 S.

Heft 64/1999

*Werner, Wolfgang:* Entwicklung eines hochpräzisen DGPS-DGLONASS Navigationssystems unter besonderer Berücksichtigung von Pseudolites. Dissertation. 226 S.

Heft 65/1999

*Krack, Klaus:* Dreizehn Aufgaben aus der Landesvermessung im Geographischen Koordinatensystem. 84 S.

Heft 66/2000

*Joos, Gerhard:* Zur Qualität von objektstrukturierten Geodaten. Dissertation. 150 S.

Heft 67/2000

*Sternberg, Harald:* Zur Bestimmung der Trajektorie von Landfahrzeugen mit einem hybriden Meßsystem. Dissertation. 158 S.

Heft 68/2000

*Oberholzer, Gustav:* Die Weiterentwicklung der Kulturlandschaft. Landespflege in der Flurbereinigung, Teil V. 150 S.

Heft 69/2000

*Hollmann, Rolf:* Untersuchung von GPS-Beobachtungen für kleinräumige geodätische Netze. Dissertation. 350 S.

Heft 70/2001

*Roßbach, Udo:* Positioning and Navigation Using the Russian Satellite System GLONASS. Dissertation. 167 S.

Heft 71/2001

*Beineke, Dieter:* Verfahren zur Genauigkeitsanalyse für Altkarten. Dissertation. 155 S.

Heft 72/2001

*Oehler, Veit:* Entwicklung eines „end-to-end“ Simulators zur Satellitennavigation unter besonderer Berücksichtigung von Pseudolite gestützten GNSS-Landesystemen. Dissertation. 212 S.

Heft 73/2001

*Schüler, Torben:* On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation. Dissertation. 370 S.

Heft 74/2001

*Neudeck, Stefan:* Zur Gestaltung topografischer Karten für die Bildschirmvisualisierung. Dissertation. 131 S.

Heft 75/2002

*Shingareva, Kira B. / Dorrer, Egon:* Space Activity in Russia – Background, Current State, Perspectives. 135 S.

Heft 76/2002

*Tiemeyer, Bernd:* Performance Evaluation of Satellite Navigation and Safety Case Development. Dissertation. 151 S.

Heft 77/2004

*Shi, Wei:* Zum modellbasierten Austausch von Geodaten auf Basis XML. Dissertation. 115 S.

Heft 78/2004

*Plan, Oliver:* GIS-gestützte Verfolgung von Lokomotiven im Werkbahnverkehr. Dissertation. 115 S.

Heft 79/2004

*Ebner, Matthias:* Ein Beitrag zur monetären Bewertung von digitaler Netzinformation in Versorgungsunternehmen. Dissertation. 107 S.

[nicht in gedruckter Form, nur digital erschienen]

Heft 80/2005

*Forstner, Gustav:* Längenfehler und Ausgangsmeridiane in alten Landkarten und Positionstabellen. Dissertation. 319 S.

Heft 81/2006

*Dutescu, Eugen:* Digital 3D Documentation of Cultural Heritage Sites Based on Terrestrial Laser Scanning. Dissertation. 140 S.

Heft 82/2007

*Schäuble, Doris:* Nutzungstausch auf Pachtbasis als neues Instrument der Bodenordnung. Dissertation. 176 S.

Heft 83/2008

*Pink, Sönke:* Entwicklung und Erprobung eines multifunktionalen Geo-Sensornetzwerkes für ingenieur-geodätische Überwachungsmessungen. Dissertation. 180 S.

Heft 84/2009

*Gräfe, Gunnar:* Kinematische Anwendungen von Laserscannern im Straßenraum. Dissertation. 177 S.

Heft 85/2010

*Heichel, Wolfgang:* Chronik der Erschließung des Karakorum. Teil II – Central Karakorum I. 460 S.

Heft 86/2010

*Riesner, André:* Möglichkeiten und Grenzen der Bewegung von Landentwicklungsprozessen und deren Nachhaltigkeit. Dissertation. 222 S.

Heft 87/2012

*Beineke, Dieter / Heunecke, Otto / Horst, Thomas / Kleim, Uwe G. F. (Hrsg.):* Festschrift für Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kurt Brunner anlässlich des Ausscheidens aus dem aktiven Dienst. 328 S.

Heft 88/2012

*Lüdecke, Cornelia / Brunner, Kurt (Hrsg.):* Von A(ltenburg) bis Z(eppelin). Deutsche Forschung auf Spitzbergen bis 1914. 100 Jahre Expedition des Herzogs Ernst II. von Sachsen-Altenburg. Tagung 2011 des Fachausschusses Geschichte der Meteorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft und des Arbeitskreises Geschichte der Polarforschung der Deutschen Gesellschaft für Polarforschung, 24.-25. September 2011, Naturkundliches Museum Mauritium, Altenburg. 120 S.

Heft 89/2012

*Hinz, Silvia Arabella:* Ganzheitliches Wertschöpfungsmodell der Waldflurbereinigung und deren Effizienzsteigerung. Dissertation. 257 S.

Heft 90/2015

*Krack, Klaus / Oberholzer, Gustav:* Die Ostausrichtung der mittelalterlichen Kirchen und Gräber. 194 S.

Heft 91/2015

*Strübing, Thorsten:* Kalibrierung und Auswertung von lasertriangulationsbasierten Multisensorsystemen am Beispiel des Gleisvermessungssystems RACER II. Dissertation. 182 S.

Heft 92/2016

*Soboth, Andrea:* Gestaltete lokale Veränderungsprozesse – Change Management als neues Instrument der Landentwicklung. Dissertation. 226 S.  
[nicht in gedruckter Form, nur digital erschienen]

Heft 93/2017

*Hendricks, Andreas:* Bodenrichtwertermittlung. Habilitationsschrift. 244 S.  
[nicht in gedruckter Form, nur digital erschienen]

Heft 94/2018

*Glabsch, Jessica:* Konzeption und Realisierung kosteneffizienter GNSS-Monitoring-Systeme für ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen. Dissertation. 156 S.



