



Entwicklung und Erprobung von GPS/GNSS Low Cost Permanent-Stationen für innerstädtische Überwachungsnetze

Development and Analysis of GPS/GNSS Low Cost Permanent Stations for Urban Monitoring Networks

Johannes Kröger



Entwicklung und Erprobung von GPS/GNSS Low Cost Permanent-Stationen für innerstädtische Überwachungsnetze
Development and Analysis of GPS/GNSS Low Cost Permanent Stations for Urban Monitoring Networks



Entwicklung und Erprobung von GPS/GNSS Low Cost Permanent-Stationen für innerstädtische Überwachungsnetze

Development and Analysis of GPS/GNSS Low Cost Permanent Stations for Urban
Monitoring Networks

Johannes Kröger

Master-Arbeit

2017

Institut für Erdmessung
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Leibniz Universität Hannover (unpubliziert)

Datum der Publikation: 25. Oktober 2017

Johannes Kröger

Entwicklung und Erprobung von GPS/GNSS Low Cost Permanent-Stationen für
innerstädtische Überwachungsnetze

Development and Analysis of GPS/GNSS Low Cost Permanent Stations for Urban
Monitoring Networks

Referent: Prof. Dr.-Ing. Steffen Schön

Co-Referent: Dr.-Ing. Tobias Kersten

Interne Publikationen am Institut für Erdmessung (IfE).

Aufgabenstellung - Master-Arbeit für Herrn Johannes Kröger

zum Thema

Entwicklung und Erprobung von GPS/GNSS Low Cost Permanent-Stationen für innerstädtische Überwachungsnetze

Development and Analysis of GPS/GNSS Low Cost Permanent Stations for Urban Monitoring Networks

Fakultät für Bauingenieurwesen
und Geodäsie

Institut für Erdmessung

Dr.-Ing. Tobias Kersten

Tel.: +49 511 762 5711

Fax: +49 511 762 4006

E-Mail: kersten

@ife.uni-hannover.de

25. April 2017

Im Rahmen von innerstädtischen GNSS-Überwachungsnetzen ist oftmals der Einsatz kostengünstiger GPS/GNSS-Empfänger und Antennen sinnvoll, da hierdurch eine schnelle und individuelle Anpassung an die örtliche Gegebenheit ohne hohen Kosten- und Arbeits- und Ressourcenaufwand möglich ist. Handelt es sich bei den zu installierenden Netzen um kleinskalige Netzgeometrien, so dass der Einsatz von leistungsstarken Einfrequenzempfängern gerechtfertigt ist, reduziert sich der Arbeits- und Datenhaltungsaufwand wesentlich.

Ziel dieser Masterarbeit ist es, eine leistungsstarke, permanente und kostengünstige Überwachungsstation für innerstädtische Bereiche zu entwickeln und das System im Rahmen einer Designstudie umfassend zu testen. Im Rahmen der Entwicklung sind zwei Szenarien zu analysieren, (1) unter Laborbedingungen auf dem Messdach des Institut für Erdmessung (ife) und (2) unter realen Bedingungen im Rahmen eines Projektes zur Überwachung von Bodensenkungen (SIMULTAN, Erdfallinstabilitäten) mit herausfordernden Satellitensichtbarkeiten. Hierbei sind insbesondere die L1-Doppeldifferenzen mind. zweier zuvor entwickelten Prototypen für beide Szenarien auf Kontinuität und Mehrwegeeffekte hin zu analysieren.

In dem Systemdesign des zu entwickelnden Prototypen sollten folgende Punkte Berücksichtigung finden: (1) Aufzeichnung bzw. Zugang zu den gemessenen Signalstärken und Rohdaten, (2) Zweckmäßigkeit der örtlichen Geräteinstallation, (3) Datenzugang bzw. Fernwartung des Monitoring-Systems, (4) Design der Empfänger- und Antenneneinheit.

Durchführung

- Literatur zur Einarbeitung in das Thema wird gestellt,
- Empfänger und Hardware wird entsprechend organisiert und zur Verfügung stehen inkl. technischer Betreuung,
- Entwicklung des Systemdesigns (Hardware- / Software-Auswahl),
- Analyse des entwickelten Systemdesigns und Designstudie anhand eines expliziten Beispiels
- Aussagen über Wirtschaftlichkeit und kritische Auseinandersetzung mit dem entwickelten Ansatz

Fragen

- Können innerstädtische Infrastrukturen, wie beispielsweise Laternen, Litfaßsäulen o.ä., für permanente Monitoring-Stationen genutzt werden?
- Welche Aussagen lassen sich über die erhaltene Datenqualität und Datenkontinuität treffen?
- Lassen sich kleine lokale Netze mit stabilen Basislinienkomponenten (besonders vor dem Fokus der Mehrwegeeffekte) kostengünstig und sinnvoll bestimmen?

Bearbeitungszeit: 6 Monate

Dr.-Ing. Tobias Kersten

Betreuer: Dr.-Ing. Tobias Kersten, Dipl. Ing. Franziska Kube, Prof. Dr.-Ing. Steffen Schön

Besucheradresse:
Schneiderberg 50
30167 Hannover
www.ife.uni-hannover.de

Zentrale:
Tel.: +49 511 762 0
Fax: +49 511 762 3456
www.uni-hannover.de

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
2. Motivation	3
2.1 Geo-Monitoring	3
2.2 Marktanalyse	3
2.3 Grundkonzeption	4
3. Entwicklung des Systemdesigns	7
3.1 Zusammenstellung der Empfängereinheit	7
3.1.1 GNSS-Receiver	7
3.1.2 Antenne	8
3.1.3 Zusatzsensorik	9
3.2 Auswahl des Prozessors	10
3.3 Datenverarbeitung	10
3.3.1 Datenformate	11
3.3.2 Datenspeicherung	11
3.3.3 Datenübertragung	12
3.4 Weitere Systemkomponenten	12
3.4.1 Schnittstellen	12
3.4.2 Gehäuse	12
3.5 Stromversorgung	12
3.6 Zusammenfassung	15
4. Analyse des Systems unter Laborbedingungen	17
4.1 Messaufbau	17
4.2 Analyse der Neukoordinaten	20
4.3 Analyse der Satellitensichtbarkeiten	22
4.4 Analyse der Signalstärken	24
4.5 Analyse der Doppeldifferenzen	27
4.5.1 Nullbasislinie	28
4.5.2 Kurze Basislinie	33
4.6 Zusammenfassung	37
5. Analyse des Systems unter realen Bedingungen	39
5.1 Messaufbau	39
5.2 Analyse der Neukoordinaten	40
5.3 Analyse der Satellitensichtbarkeit	41
5.4 Analyse der Signalstärken	42
5.5 Auswertung der Positionsbestimmung	44
5.6 Auswertung der atmosphärischen Daten	44
6. Wirtschaftlichkeitsanalyse	47
7. Zusammenfassung und Ausblick	49

Literaturverzeichnis	50
Abkürzungsverzeichnis	53
Tabellenverzeichnis	54
Abbildungsverzeichnis	56
Anhang	59
A. Abschätzung der autonomen Stromversorgung	61

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich, die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und unter ausschließlicher Verwendung der angegebenen Literatur sowie Hilfsmittel erstellt zu haben.

Diese Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

(Ort, Datum)

(Unterschrift des Autors)

1. EINLEITUNG

Das Interesse an der Überwachung der Umwelt hat einen uneingeschränkt großen Stellenwert für die Gesellschaft, nicht zuletzt aufgrund von Sicherheitsaspekten. Dies wird auch durch den Klimawandel sowie steigendem Rohstoffabbau infolge der wachsenden Weltbevölkerung in Zukunft nicht an Relevanz verlieren. Aufgrund dessen wird der Beobachtung und Analyse von Bodenbewegungen mittels verschiedener geodätischer und geophysikalischer Techniken immense Bedeutsamkeit beigemessen, um Sach- und Personenschäden abzuwenden zu können.

Für eine kontinuierliche Erfassung von Landbewegungen eignen sich insbesondere globale Satellitensysteme (Global Navigation Satellite Systems (GNSS)), da diese einerseits als selbstständige Monitoringsystem agieren und andererseits in klassische Überwachungsmethoden, wie das Feinnivellement, integriert werden können (Awange, 2012).

Oftmals ist der Einsatz eines GNSS-Monitoringsystems mit enormen Kosten verbunden, da spezielle geodätische Empfänger und Antennen benötigt werden, um eine hohe Präzision und Richtigkeit der Messungen im Millimeterbereich gewährleisten zu können. Hinzu kommt ein hoher Arbeits- und Ressourcenaufwand, um das Überwachungsnetz einzurichten und das System an die örtlichen Gegebenheiten anzupassen.

Durch den in letzter Zeit wachsenden Markt für kompakte GNSS-Empfangseinheiten – unter anderem bedingt durch den steigenden Verbau in mobilen Endgeräten – verringern sich die Kosten für GNSS-Chips, sodass diese eine gute Option für den Einsatz innerhalb eines Monitoringsystems darstellen.

Sofern es sich bei den zu installierenden Überwachungsnetzen um kleinskalige Netzgeometrien handelt und ein permanenter und autarker Betrieb sichergestellt werden kann, rechtfertigt sich der Einsatz von leistungsstarken Einfrequenzempfängern, da sich neben den Kosten auch der Arbeits- und Datenhaltungsaufwand deutlich reduziert.

Daher ist das Ziel dieser Arbeit, eine GPS/GNSS Low Cost Permanent-Station für innerstädtische Überwachungsnetze zu entwickeln und anschließend zu erproben.

Im ersten Teil der Arbeit wird eine Marktanalyse von vorhandenen Low-Cost Monitoringsystemen vorgenommen und davon ausgehend das Konzept des zu entwickelnden Systems festgelegt, welches in Kapitel 3 zusammengestellt wird. Das Hauptaugenmerk wird dabei auf die Zusammenstellung der Empfängereinheit sowie die autarke Stromversorgung gelegt. In Kapitel 4 wird die Analyse des entwickelten Systems unter Laborbedingungen auf dem Messdach des Institut für Erdmessung (IfE) beschrieben. Kapitel 5 stellt das Testen des Systems unter realen Bedingungen innerhalb eines Projektes zur Überwachung von Bodensenkungen dar. In Kapitel 5 wird eine Wirtschaftlichkeitsanalyse vorgenommen und der entwickelte Ansatz kritisch diskutiert.

2. MOTIVATION

In diesem Kapitel werden zunächst wesentliche Aspekte des Geo-Monitorings dargestellt, um die Anforderungen an ein Überwachungssystem festzulegen. Ausgehend von einer Marktanalyse wird die Grundkonzeption des zu entwickelnden Systems definiert.

2.1 Geo-Monitoring

Im Rahmen der Entwicklung einer Permanent-Station für innerstädtische Überwachungsnetze muss zunächst definiert werden, was die Aufgaben und Ziele von Überwachungsnetzen sind.

Im Allgemeinen bezeichnet die Überwachung bzw. das Monitoring nach James et al. (2003) das Beobachten, Erkennen oder Aufnehmen eines Systembetriebs insbesondere vor dem Hintergrund des Überwachens, der Kontinuität und der Erkennung von Veränderungen. Da Monitoring Veränderungen impliziert und dieses die Zeitkomponente mit einschließt, bedeutet Überwachung das Messen von Objekten, die sich in einem System über Zeit und Raum ändern. Somit ist dies ein Prozess, der auf der Vermessung und Überwachung beruht, wobei es nach Spellerberg (2005) einen spezifischen Grund für die Erhebung von diesen Daten gibt.

Im Bereich des Geo-Monitorings oder allgemein der Überwachung der Umwelt bedeutet dies die Beobachtung und Analyse der Umwelt, um beispielsweise Klimaveränderungen oder Landbewegungen zu detektieren. Gerade im letzten Fall eignen sich GNSS, wie beispielsweise Global Positioning System (GPS), GLObal NAVigation Satellite System (GLONASS) oder Galileo, da diese Satellitensysteme sich nach Awange (2012) besonders zur kontinuierlichen Positionsbestimmung eignen.

Werden einzelne GNSS-Stationen zusammen ausgewertet, so ergibt sich eine Netzausgleichung mit dem Vorteil, dass die Genauigkeit durch die differentielle Positionsbestimmung gesteigert werden kann. Außerdem werden bei kleinskaligen Netzgeometrien zahlreiche Fehlereinflüsse der Messungen reduziert beziehungsweise eliminiert (Hofmann-Wellenhof et al., 2007).

Vorteilhaft an der Nutzung eines GNSS beim Geo-Monitoring gegenüber anderen Methoden (z.B. Präzisionsnivellement oder Verwendung von Tachymetern) ist, dass mit einer hohen Messrate automatisch und kontinuierlich Daten erzeugt werden ohne dass nach Einrichtung des Überwachungsnetzes Arbeitskräfte benötigt werden. Dies wirkt sich besonders positiv auf die anfallenden Gesamtkosten des Projektes aus, sodass gegenwärtig oftmals (zusätzlich) GNSS-Messungen beim Geomonitoring verwendet werden. (Hofmann und Korth, 2011).

2.2 Marktanalyse

Bei der Entwicklung eines neuen Systems sollte zunächst eine Marktanalyse vorgenommen werden, um zu überprüfen welche Konzepte bereits auf dem Markt sind und wie sich das zu entwickelnde System davon abgrenzt. Daher wurden Recherchen zu Systemen durchgeführt, die Deformations- bzw. Monitoringlösungen anbieten.

So bietet die *Alberding GMBH* das *Alberding A07-MON* Monitoring-System an, welches automatisiert und kontinuierlich Koordinatenänderung von gewählten Messpunkten liefert. Das System umfasst im wesentlichen eine L1 GNSS-Antenne, eine kontinuierliche Stromversorgung über Solarpanels, ein Messpfeiler zur Anbringung des Systems, eine Mobilfunkkarte mit Datenpaket sowie Zugangsdaten zum betriebseigenen Server.

Das System sendet die aufgezeichneten Daten automatisch an den Server, wo diese in bestimmten Intervallen gegen eine Referenzstation prozessiert und visualisiert werden. Außerdem können automatische Warnhinweise gesendet werden, sofern ein bestimmter Schwellwert überschritten wird. (Stempfhuber und Alberding, 2017)

Die Firma *DMT* vertreibt das Low-Cost System *SAFEGUARD GNSS*, mit dem sich ebenfalls Koordinatenänderungen bestimmen und über einen Webserver visualisiert anzeigen lassen. Die Funktionalitäten sind ähnlich zu denen des *Alberding A07-MON* (Datenspeicherung und Verarbeitung, Zusatzsensorik) und auch die Stromversorgung lässt sich über einen internen Akku und Solarpanels sicherstellen. Bei diesem System wird ein u-blox Empfänger verwendet und als Ausstattungsoptionen werden entweder eine L1-Tallysman Antenne oder eine navXperience 3G+C Antenne angeboten. (Schröder et al., 2017)

Laut den Angaben der Hersteller können so Genauigkeiten im Bereich von 1 cm erzielt werden, wobei dies unter anderem abhängig von der Basislinienlänge, der Satellitengeometrie, der Beobachtungsdauer, der gewählten Antenne und den Stationseigenschaften ist. (Schröder et al., 2017; Stempfhuber und Alberding, 2017)

Des weiteren betreiben diverse Hochschulen, darunter das Institut für Ingenieurgeodäsie an der Universität Stuttgart und das Geodätische Institut der Technischen Universität Dresden, Forschung zur präzisen Positionsbestimmung mit Low-Cost GNSS-Empfängern.

2.3 Grundkonzeption

Ausgehend von den bereits auf dem Markt vorhandenen Systemen wird im Folgenden das Konzept und die Spezifikation des zu entwickelnden Systems festgelegt. Abbildung 2.1 zeigt den groben Entwurf des Systems mit den wichtigsten Komponenten. Die Farbgebung indiziert vier der fünf großen Arbeitspakete, die für die Systementwicklung essentiell sind. Tabelle 2.1 fasst diese Arbeitspakete zusammen und gibt einen ersten Überblick über deren Bestandteile. Eine ausführliche Beschreibung des Entwicklungsprozesses des Systems ist in Kapitel 3 gegeben.

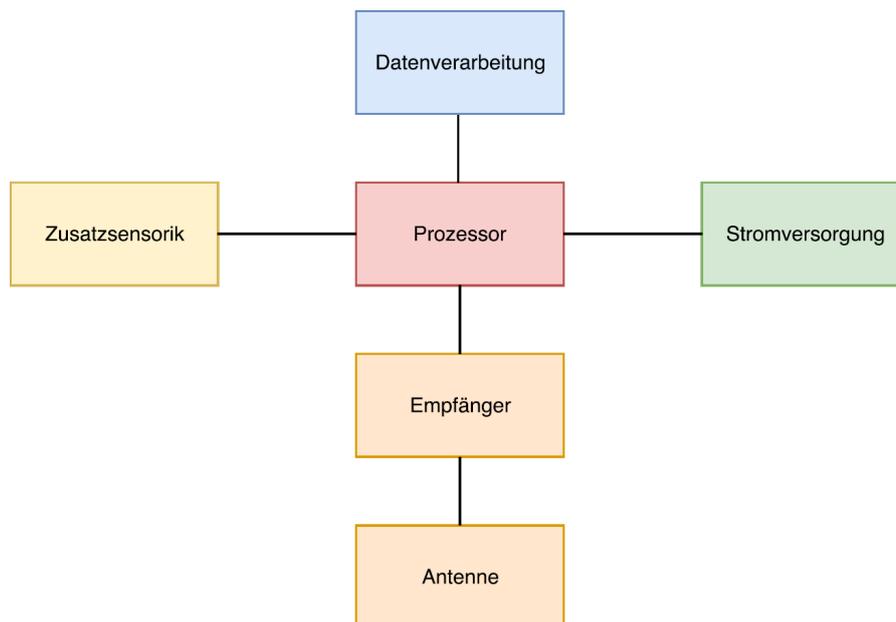


Abbildung 2.1: Grober Entwurf des Systems, eingeteilt in Arbeitspakete.

Tabelle 2.1: Übersicht der Arbeitspakete und deren Bestandteile für das Systemdesign

Arbeitspaket	Bezeichnung	Farbgebung (vgl. Abb 2.1)	Bestandteile
A	Empfangseinheiten	gelb	Antenne, Empfänger, Zusatzsensorik
B	Prozessor	rot	Prozessor (Hardware), Schaltung
C	Datenverarbeitung	blau	Speicherung, Übertragung, Zugriff
D	Weitere Komponenten	-	Gehäuse, Schnittstellen
E	Stromversorgung	grün	Akku, Solarpanel, Verbrauch

Um die Kosten des gesamten Systems in Grenzen zu halten, werden lediglich leistungsstarke Einfrequenzempfänger in Betracht gezogen, die neben GPS auch weitere GNSS, wie GLONASS oder Galileo, unterstützen. Durch dieses Multi-GNSS Konzept können auch herausfordernde Satellitengeometrien, wie sie beispielsweise in Straßenschluchten auftreten, besser gelöst werden, da die Satellitenumlaufbahnen der verschiedenen Systeme unterschiedliche Inklinationen aufweisen und sich dementsprechend nach Hofmann-Wellenhof et al. (2007) voneinander abweichende Satellitensichtbarkeiten für die jeweilige Station ergeben. Eine weitere Anforderung an den Empfänger ist die Möglichkeit der Rohdatenausgabe, damit die Performance des Systems nicht nur auf Koordinaten- sondern auch auf Beobachtungsebene evaluiert werden kann.

Als deutliche Abgrenzung zu den bereits bestehenden Systemen soll eine wesentliche Eigenschaft des Systems die Modularität darstellen, sodass das System schnell und flexibel für unterschiedliche Umgebungen bzw. Aufgaben geeignet ist. So soll nicht nur die Möglichkeit bestehen, unterschiedliche Antennen problemlos zu installieren, sondern auch die Empfängereinheit einfach auszubauen, um sie für ein anderes Projekt verwenden zu können. Über Standardschnittstellen (Arbeitspaket D) soll außerdem die Möglichkeit bestehen, sowohl den Receiver als auch den Prozessor anzusteuern, um Einstellungen direkt ändern zu können.

3. ENTWICKLUNG DES SYSTEMDESIGNS

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des Systems nach den in Kapitel 2.3 spezifizierten Komponenten und eingeteilten Arbeitspaketen beschrieben. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Wahl der Empfängereinheit, da diese eine essenzielle Komponente für die Leistungsfähigkeit des Systems darstellt.

3.1 Zusammenstellung der Empfängereinheit

Im Folgenden wird die Zusammenstellung der Empfängereinheit beschrieben, die aus einem GNSS-Receiver, einer Einfrequenz-Antenne sowie atmosphärischen Sensoren besteht. Dazu werden jeweils wichtige Kriterien, die bei der Auswahl von Bedeutung sind, kurz erläutert.

3.1.1 GNSS-Receiver

In Anbetracht der Tatsache dass eine Low-Cost Station entwickelt wird, beschränkt sich die Auswahl des Receivers auf Einfrequenzempfängern, wie es bereits bei der Grundkonzeption (vgl. Kapitel 2.3) festgelegt wurde. Weitere Parameter, neben der erreichbaren Genauigkeit, die bei der Wahl eines Receivers einfließen sollten, sind nach Hamilton (2016) beispielsweise:

- ▶ Gesamtanzahl der Kanäle
- ▶ Signale und Anzahl der Satelliten, die getrackt werden
- ▶ Größe und Gewicht
- ▶ Messrate
- ▶ Schnittstellen
- ▶ Stromverbrauch

Auf Grundlage dieser Indikatoren wurde schlussendlich der u-blox EVK-M8T Receiver ausgewählt, auch da Empfangseinheiten von u-blox bei vergleichbaren Projekten verwendet wurden (Weston und Schwieger, 2014; Schröder et al., 2017).

Bei der Wahl des Receivers wurde hierbei vor allem Augenmerk darauf gelegt, dass sich bei der Evaluation Kit (EVK)-Reihe Empfängereinstellungen einfach durch das u-center ändern lassen, da dieses neben einer graphischen Oberfläche eine ausführliche Beschreibung liefert. Des Weiteren bietet die Timing-Serie (T) der u-blox Empfänger die Möglichkeit der Rohdatenaufzeichnung. Diese sind für die Erstellung von Receiver Independent Exchange Format (RINEX)-Dateien zwingend erforderlich.

Weitere Empfänger, die bei der Wahl des GNSS-Receiver in Frage kamen, waren beispielsweise Einfrequenzempfänger des Herstellers Javad oder der Firma NVS Technologies AG. Diese wurden letztlich aufgrund des höheren Anschaffungspreises beziehungsweise für das Projekt ungeeigneten Schnittstellen nicht gewählt.

Der u-blox Empfänger bietet unterschiedliche serielle Schnittstellen, wovon im Rahmen dieser Arbeit der USB 2.0 Anschluss verwendet wird, um Einstellungen über das u-center zu ändern und insgesamt fünf Pins zur Stromversorgung und zum Auslesen der Messdaten. Die genaue Pinbelegung ist in Kapitel 3.2 ersichtlich. Der Empfänger ist in einem Temperaturbereich von -40°C bis $+65^{\circ}\text{C}$ betriebsfähig und eignet sich somit in mittleren geographischen Breiten auch im Winter für Outdoor-Anwendungen. Als Antennenanschluss ist an der Außenseite eine SubMiniature version A (SMA)-Buchse angebracht, an der aktive oder passive Antennen angeschlossen werden können. Außerdem dient eine interne Backup-Batterie dazu, Orbitinformationen zwischenspeichern und einen schnelleren Starten zu ermöglichen. Der Empfänger unterstützt dabei nach u-blox (2016) folgende Satellitensysteme auf einer Frequenz:

- ▶ GPS
- ▶ Quasi-Zenit-Satelliten-System (QZSS)
- ▶ GLONASS
- ▶ Galileo
- ▶ BeiDou

3.1.2 Antenne

Die Charakteristik und Leistungsfähigkeit einer Antenne hängt von einer Vielzahl an Qualitätsparametern ab, die im Folgenden beschrieben werden. Das entscheidende Kriterium ist dabei, dass die Antenne auf den in Kapitel 3.1.1 gewählten Receiver abgestimmt wird. Außerdem verhält sich eine Antenne gleichermaßen als Orts- und Frequenzfilter und hat somit einen direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Empfängers (NovAtel, 2016).

Da der gewählte Receiver sensitiv für die von den verschiedenen Satellitensystemen ausgesendeten Frequenzen ist, sollte die Antenne eben diese ebenfalls abdecken. Daher wird die Wahl auf Einfrequenz Antennen beschränkt, die die Frequenzen und Bandbreiten der GPS-, GLONASS- und Galileo-Signalen abdecken. Nachfolgend werden weitere wichtige Qualitätsparameter nach NovAtel (2016) beschrieben, die die Leistungsfähigkeit einer Antenne charakterisieren:

▶ **Antennengewinn**

Der Antennengewinn (Antenna Gain) ist ein äußerst relevanter Indikator für die Leistungsfähigkeit einer Antenne. So hängt der Antennengewinn direkt mit dem Träger-Rausch-Verhältnis (Carrier-Noise Ratio) C/N_0 zusammen, sodass der Antennengewinn die Tracking-Fähigkeit des Systems definiert. Somit wird durch den Antennengewinn nach Misra und Enge (2012) ausgedrückt, in welchem Ausmaß die empfangenen Signale verstärkt oder abgeschwächt werden.

▶ **Dämpfung des Antennengewinns**

Die Dämpfung des Antennengewinns (Gain roll-off) ist ein Faktor der Strahlbreite (Beamwidth) und gibt an, wie sich der Antennengewinn mit der Elevation e eines Satelliten verändert. Somit wird die Variation des Antennengewinns zwischen Signalen von einem im Horizont ($e \approx 0^\circ$) und Zenit ($e \approx 90^\circ$) stehenden Satelliten beschrieben. Die verschiedenen Bauweisen der Antennen besitzen einen unterschiedlichen *Gain roll-off*. So sind Patch-Antennen derart konzipiert, dass sie Signale auch von sehr niedrigen Elevationswinkeln tracken können, wohingegen Choke-Ring-Antennen oftmals Signale unter 30° nicht empfangen können.

▶ **Rauschzahl**

Durch die Rauschzahl (Noise figure) wird angegeben, wie viel zusätzliches Rauschen durch das System und seine Komponenten, wie beispielsweise dem *Low Noise amplifier* (Rauscharmer Verstärker) dem Signal hinzugefügt wird. Daher hat die Rauschzahl (Noise figure) einen direkt Einfluss auf den C/N_0 , wobei eine geringe Rauschzahl ein höheres C/N_0 bedingt, sodass die Tracking-Fähigkeit des Empfängers erhöht wird. Nach NovAtel (2016) besitzen gute Antennen eine Rauschzahl von weniger als 3 dB.

▶ **Stehwellenverhältnis**

Das Stehwellenverhältnis (Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)) ist ein Maß dafür, wie viel Leistung zwischen der Antenne und dem Empfänger im Koaxialkabel übertragen wird und zeigt an, wie sich die Antenne bei einer gewissen Impedanz verhält, welche normalerweise 50Ω beträgt. Bei einem idealen VSWR von 1 wird keine Leistung von der Antenne reflektiert, sodass die gesamte aufgenommene Leistung zum Empfänger übertragen wird.

▶ **Unterdrückung von Mehrwegeeffekten**

Für die Entwicklung einer innerstädtischen Permanent-Station ist es von immenser Bedeutung, dass Mehrwegeeffekte möglichst stark unterdrückt werden, damit der Positionierungsfehler, der unter anderem durch mehrfache Reflexionen der Satellitensignale von nahen oder weiter entfernten Objekten entsteht, reduziert wird. Um Mehrwegeeffekte zu minimieren, sollte die Antenne möglichst nahe der Horizontalfläche und möglichst weit weg von reflektierenden Objekten angebracht werden. Außerdem können spezielle Antennenbauweisen, wie beispielsweise Choke-Ring-Antennen verhindern, dass reflektierte Signale das Phasenzentrum erreichen. Ein weiterer Indikator, um zu definieren, inwiefern die

Antenne reflektierte Signale unterdrücken kann, ist das Achsverhältnis (Axial Ratio) der orthogonalen Komponenten eines elektrischen Feldes. Nach NovAtel (2016) sollte das Achsverhältnis dabei möglichst gering sein.

► **Phasenzentrum**

Das Phasenzentrum einer Antenne ist der Punkt, an dem die Satellitensignale empfangen werden, wobei dieser Punkt allerdings nicht stabil ist. So verändert sich das elektronische Phasenzentrum der Antenne mit der Richtung des eingehenden Signals mit einer Größenordnung von einigen Millimetern. Dies wird als Phasenzentrumsvariationen (Phase Center Variation (PCV)) bezeichnet. Hinzu kommt der frequenzabhängige Phasenzentrumsoffset (Phase Center Offset (PCO)), welcher der Abstand zwischen dem Antennen Referenzpunkt (ARP) und dem elektronischen Phasenzentrum ist. Für eine präzise Punktbestimmung sollte daher das Phasenzentrum möglichst stabil sein.

► **Weitere Indikatoren**

Weitere Spezifikationen für Antennen sind beispielsweise deren Ausmaße, die Farbe, das Gewicht, der Stromverbrauch, die Betriebstemperatur sowie die Möglichkeiten zur Montage, welche für eine Permanentstation wichtig sind, da diese möglichst stabil sein muss. Das Gewicht und die Größe sind in erster Linie nicht so relevant. Soll das System allerdings auf eine Laterne angebracht werden, so muss darauf geachtet werden, dass diese das gesamte System tragen kann. Auch muss die Antenne zwingend wasserdicht sein, da sie permanent im Outdoor-Bereich verwendet werden soll.

Nach eingehender Recherche wird schlussendlich die Leistungsfähigkeit von insgesamt drei Antennen analysiert. Dabei soll herausgefunden werden, welche Antenne in Kombination mit dem gewählten u-blox EVK-M8T Receiver die beste Performance liefert. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Spezifikationen der drei gewählten Antennen, wobei bei allen die Polarisation des Signales rechtshändig drehend ist und die Impedanz bei 50 Ω liegt.

Tabelle 3.1: Technische Spezifikationen der vorausgewählten Antennen.

Hersteller	Modell	VSWR	min. Gain (at Zenith)
Novatel	GNSS-501	$\leq 2,0:1$	4,00 dBic
Tallysman	TW2920	$< 1,8:1$	4,25 dBic
u-blox	ANN-MS	$< 2,0:1$	4,00 dBic

3.1.3 Zusatzsensorik

Zur Erfassung von atmosphärischen Daten werden in dem System zusätzlich zwei Sensoren verbaut. Sowohl ein Temperatur und Luftfeuchtigkeitssensor (DHT22) als auch ein Sensor zur Messung des Luftdrucks (BMP280). Vorteilhaft an den Sensoren ist neben dem günstigen Preis (jeweils unter 4 €) auch die kleine Dimension und das geringe Gewicht (1,7 cm x 1,6 cm x 0,2 cm & 2 g für den BMP280 sowie 4,2 cm x 1,5 cm x 10 cm & 7 g für den DHT22). Förderlich ist außerdem, dass beide Sensoren ein digitales Signal übertragen und einen geringen Stromverbrauch aufweisen. Tabelle 3.2 gibt einen Überblick über den Arbeitsbereich, die Genauigkeiten, den Auflösungen sowie den Präzisionen der atmosphärischen Messgrößen. Der Nachteil an den Sensoren ist allerdings, dass diese nicht wasserfest sind und dementsprechend im Gehäuse verbaut werden müssen, (Bosch, 2015; Liu, 2013).

Tabelle 3.2: Technische Spezifikationen der Zusatzsensoren.

Sensor	Arbeitsbereich	Genauigkeit	Auflösung	Präzision
DHT22 (Temperatur)	-40 °C bis + 80 °C	0,5 °C	0,1 °C	0,1 °C
DHT22 (rel. Luftfeuchte)	0 % bis 100 %	2 %	0,1 %	1 %
BMP280 (Luftdruck)	300 hPa bis 1100 hPa	1 hPa	0,16 hPa	0,12 hPa

Mittels der erfassten atmosphärischen Daten lassen sich durch Zeitreihenanalysen gewisse Trends und meteorologische Messgrößen, die auch interdisziplinär von Belangen sind, ableiten. Außerdem kann überprüft werden, ob beispielsweise temperaturabhängige Effekte in den Messungen auftreten oder ob sich die Performance des Systems bei gewissen äußerlichen Einflüssen ändert. Von Interesse könnte hierbei zum Beispiel die Leistungsfähigkeit der gewählten Stromversorgung (vgl. Abschnitt 3.5) sein.

Auch bei der Analyse der effektiven atmosphärischen Signalverlängerung in Zenit-Richtung, beispielsweise bei der Verwendung des Hopfield-Modells zur Berechnung des Einflusses aufgrund der Troposphäre, werden nach Xu und Xu (2016) als Eingangsgrößen die atmosphärischen Stationsdaten benötigt. Allerdings wird bei der Bildung von Doppeldifferenzen im Rahmen dieser Arbeit kein Troposphärenmodell verwendet, da die Effekte der Atmosphäre durch die Differenzbildung bei den kurzen Basislinien nahezu eliminiert werden (vgl. Abschnitt 4.5).

In Kapitel 5.6 sind Zeitreihen der Messungen von Temperatur, Luftfeuchte sowie Luftdruck dargestellt, sodass beispielsweise die Stabilität der kostengünstigen Sensoren überprüft werden kann.

3.2 Auswahl des Prozessors

Als Prozessor wurden zunächst aktuelle Modelle von Raspberry Pi oder Arduino in Betracht gezogen. Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über den durchschnittlichen Stromverbrauch der verschiedenen Modelle. Der jeweilige Verbrauch hängt von diversen Faktoren ab, wie beispielsweise den eingebauten Mikrocontrollern, der Komplexität der durchzuführenden Berechnungen und den zusätzlich angeschlossenen Komponenten und deren Verbrauch.

Tabelle 3.3: Typischer Stromverbrauch verschiedener Prozessoren.

Modell	Betriebsspannung [V]	typischer Stromverbrauch [mA]
Raspberry Pi 2 Model B	5	350
Raspberry Pi 3 Model B	5	400
Raspberry Pi Zero	5	100
Arduino Mega 2560	5	50
Arduino Genuino Zero	3,3	20

Aus Tabelle 3.3 wird deutlich, dass die Arduino-Prozessoren im Vergleich zu den Raspberry Pi Modellen einen durchschnittlich geringeren Stromverbrauch aufweisen, was unter anderem an den eingebauten Mikrocontrollern liegt. So können die Raspberry Pis beispielsweise mehrere Prozesse gleichzeitig ausführen und besitzen auch eine höhere Rechengeschwindigkeit. Da vor allem die permanente und autarke Stromversorgung über Sonnenenergie eine große Herausforderung darstellt, sollte ein Modell mit einem geringen Stromverbrauch gewählt werden. Der Vorteil der Modelle von Arduino gegenüber den von Raspberry Pi ist, dass diese unempfindlich gegenüber Stromunterbrechungen sind, (Arduino, 2017; Raspberry Pi, 2017).

Da verschiedene Hardware-Komponenten, wie beispielsweise der GNSS-Empfänger und die atmosphärischen Sensoren, an den Prozessor angeschlossen werden, fiel die Wahl des Prozessors auf den Arduino Mega 2560, da dieser deutlich mehr digitale Pins (54) als der Arduino Zero (20) oder auch dem Standardmodell Arduino Uno (14) besitzt. Um Kosten zu sparen und aufgrund der Tatsache, dass der Funduino Mega bau- und funktionsgleich zum Arduino Mega ist, wurde schlussendlich dieser gewählt. Im Folgenden wird im Rahmen dieser Arbeit allerdings weiterhin von Arduino gesprochen, da dieser einen deutlich höheren Bekanntheitsgrad besitzt.

3.3 Datenverarbeitung

Dieser Abschnitt beschreibt das Datenmanagement des zu entwickelnden Systems. Es werden sowohl die relevanten Datenformate beschrieben, als auch die interne Speicherung sowie der externe Zugriff auf die Daten.

3.3.1 Datenformate

Der gewählte u-blox Empfänger bietet diverse Möglichkeiten der Datenausgabe. Zum einen kann das National Marine Electronics Association (NMEA)-Format ausgegeben werden, zum anderen das binäre .ubx-Format. Für beide Optionen gibt es zahlreiche Nachrichten, deren Inhalte sich stark unterscheiden. Um Speicherplatz und Rechenzeit zu minimieren, werden nur die *ubx*-Protokolle ausgegeben. Einzelheiten zu den verschiedenen Nachrichten können in u-blox (2017) nachgelesen werden.

Für das entwickelte System sind folgende Nachrichten von Interesse:

- ▶ UBX-RXM-RAWX: Multi-GNSS Rohmessdaten zur Erstellung von RINEX-Beobachtungsdateien.
- ▶ UBX-NAV-TIMEGPS: Präzise GPS-Zeit als Zeitstempel für die atmosphärischen Messungen.
- ▶ UBX-NAV-TIMEUTC: Präzise Coordinated Universal Time (UTC)-Zeit, um das Änderungsdatum der erstellten Dateien setzen zu können.

Die UBX-RXM-RAWX Nachricht enthält neben der lokalen Empfängeruhrzeit, der Pseudorange-, Trägerphasen- und Dopplermessungen zu den jeweiligen Satelliten auch die Signalstärke (Carrier-to-noise density ratio) sowie die Standardabweichungen der Messungen. Die UBX-NAV-TIMEGPS Nachricht übermittelt die GPS-Sekunden der Woche, die GPS-Woche, die GPS-Schaltsekunden (GPS-UTC) sowie die Genauigkeitsschätzung der Zeitangaben. Die UBX-NAV-TIMEUTC Nachricht beinhaltet nach u-blox (2017) ebenfalls die GPS-Sekunden der Wochen und darüber hinaus die UTC-Zeit (Jahr, Monat, Tag, Stunde, Minute, Sekunde sowie Sekundenbruchteil) und deren Genauigkeit.

3.3.2 Datenspeicherung

Um die Daten abspeichern zu können, wurde als weitere Systemkomponente das Ethernet-Shield ausgewählt. Dieses kann direkt auf den Arduino-Mega gesteckt werden und bietet neben einem Secure Digital (SD)-Kartenslot eine Ethernet-Schnittstelle.

Zur Datenübertragung und anschließenden Speicherung wird der u-blox Empfänger über die serielle Schnittstelle mit dem Prozessor verbunden. Die Stromversorgung des Receivers wird über die Pins 14 (V5_IN) und 13 (GND) realisiert, sodass dieser mit 4,75 V bis 5,25 V vom Prozessor versorgt wird. Zur Datenübertragung werden die Pins 1 bis 3 verwendet. Pin 1 (GND) dient dabei als Masse, Pin 2 (RxD) zum Empfangen von Daten und Pin 3 (TxD) wird zum Versenden des Datenstroms genutzt. (u-blox, 2016)

Der eingehende Datenstrom, welcher die vom Empfänger an den Prozessor gesendeten *ubx*-Nachrichten sind, wird zunächst in einem Array zwischengespeichert und anschließend binär auf einer 8 GB SD-Karte abgespeichert. Anschließend werden die atmosphärischen Daten der beiden Sensoren ausgelesen (siehe Abschnitt 3.1.3) und die beiden binären *ubx*-Nachrichten, die die GPS- beziehungsweise UTC-Zeit enthalten, als American Standard Code for Information Interchange (ASCII)-Zeichen interpretiert. Somit können die Dateinamen erstellt werden, die wie folgt aufgebaut sind

A_www_D.txt

G_www_D.ubx

Dabei steht **A** für die atmosphärischen und **G** für die GNSS Daten. Anschließend folgt die vierstellige GPS-Woche (www) sowie der Tag der Woche (D), wobei Sonntag der nullte und Samstag der sechste Tag der Woche ist. Die Wahl der Dateinamen wurde so gewählt, da nach Arduino (2017) die verwendete Bibliothek das FAT32-Dateisystem verwendet, bei dem Dateinamen nur die Länge 8.3, acht Zeichen für den Dateinamen an sich und drei Zeichen für die Dateierweiterung, besitzen dürfen. Die atmosphärischen Messungen werden als "tab-delimited"-Textdatei (.txt) abgespeichert und beinhalten die GPS-Woche, die GPS-Sekunden der Woche, die Schaltsekunden (GPS-UTC), die Temperatur in Grad Celsius, die relative Luftfeuchtigkeit sowie den Luftdruck in Hektopascal. Die GNSS-Daten werden als binäre Daten abgespeichert und können im Postprocessing beispielsweise mit der Open-Source-Software *rtklib* in eine RINEX-Datei konvertiert werden.

3.3.3 Datenübertragung

Die Datenübertragung kann prinzipiell über drei Wege realisiert werden. Die trivialste ist dabei, nach Ende einer Messung die SD-Karte zu entfernen und die Daten an einem Computer auszulesen. Dies ist allerdings bei einer Permanentstation nicht zielführend, sodass das Konzept eine Übertragung der Daten mittels Mobilfunkdaten (General Packet Radio Service (GPRS)) erarbeitet wurde. Dazu wurde das Subscriber Identity Module (SIM)-Modul SIM800L in Betracht gezogen. Aufgrund von internen Regularien konnte allerdings keine SIM-Karte beschafft werden, sodass stattdessen ein Web-Server eingerichtet wurde. Mittels eines Ethernet-Crossoverkabels, einer Gigabit-Schnittstelle am Computer oder einem Switch, können nach Arduino (2017) so die Dateien direkt heruntergeladen werden, wobei die statische Internet Protocol (IP)-Adresse des Arduinos 130.75.97.56 lautet.

3.4 Weitere Systemkomponenten

Die Beschreibung der weiteren Systemkomponenten beschränkt sich im Wesentlichen auf die Realisierung von Standardschnittstellen und der Auswahl eines robusten Gehäuses.

3.4.1 Schnittstellen

Insgesamt sollen zwei Universal Serial Bus (USB) 2.0 A Schnittstellen realisiert werden, um die Flexibilität des Systems sicherzustellen. Zum einen gibt es eine Buchse zur Ansteuerung des Prozessors. Hiermit ist gewährleistet, dass neue Programme auf den Arduino geladen werden können, falls zum Beispiel die statische IP-Adresse geändert werden soll oder es zu generellen Anforderungsänderungen an das System kommen sollte. Zum anderen gibt es eine USB-Buchse zur Ansteuerung des Empfängers. So können nach u-blox (2017) durch das *u-center* einfach Einstellungen am Receiver vorgenommen werden, wie beispielsweise:

- ▶ Änderung der Messrate
- ▶ Deaktivierung oder Aktivierung von Satellitensystemen
- ▶ Modifikation der Nachrichten, die vom Empfänger gesendet werden
- ▶ Veränderung der Baudrate
- ▶ Verwenden des Sleep/Wake-up Modus des Receivers

3.4.2 Gehäuse

Die gesamten Systemkomponenten werden in einem wasserfesten und robusten Gehäuse untergebracht, welches der Schutzklasse International Protection (IP) 67 entspricht. Die erste Ziffer gibt den Schutz gegen Fremdkörper und Berührungen an. In diesem Fall ist das System staubdicht und besitzt einen vollständigen Schutz gegen Berührungen. Die zweite Ziffer zeigt den Schutz gegen Wasser an, sodass in diesem Fall das Gehäuse Schutz gegen zeitweiliges Untertauchen bietet (DIN EN 60529:2014-09, 2014). An der Frontseite werden die Schnittstellen (vgl. Kapitel 3.4.1), ein Threaded Neill Concelman (TNC)-Antenneanschluss, ein Ausgang für das Micro-USB-Kabel des Solarpanels sowie ein An/Aus-Schalter angebracht.

3.5 Stromversorgung

Um eine Permanentstation realisieren zu können, die kontinuierlich Daten aufzeichnet, ist eine autarke Stromversorgung unabdingbar. Durch Laden eines Akkus oder einer wiederaufladbaren Batterie mit Sonnenlicht kann dies prinzipiell realisiert werden. Dazu müssen allerdings die Leistung des Solarpanels und die Kapazität des Akkus auf den Energiebedarf des Systems abgestimmt werden. Außerdem ist es von großer Relevanz, dass der Akku die sogenannte Durchgangsladung beziehungsweise das *Pass-through-charging* unterstützt, sodass gleichzeitig der Prozessor mit Strom versorgt werden kann und der Akku geladen werden kann. Auch muss der Akku einen Schutz vor Überspannung, Überhitzung und Selbstentladung besitzen. Um den Verbrauch des Systems mit den bisher ausgewählten Komponenten abschätzen zu können, wurde ein USB-Monitor zwischen der Stromquelle, welches zu dem damaligen Zeitpunkt der USB-Ausgang eines Computer war, und dem Prozessor

geschaltet. Der USB-Monitor misst den Stromverbrauch und zeigt dabei die Spannung und die Stromstärke bis zu einer maximalen Leistung von 5 V beziehungsweise 5 A an. Die Messanordnung inklusive der angeschlossenen Systemkomponenten ist in Grafik 3.1 ersichtlich.

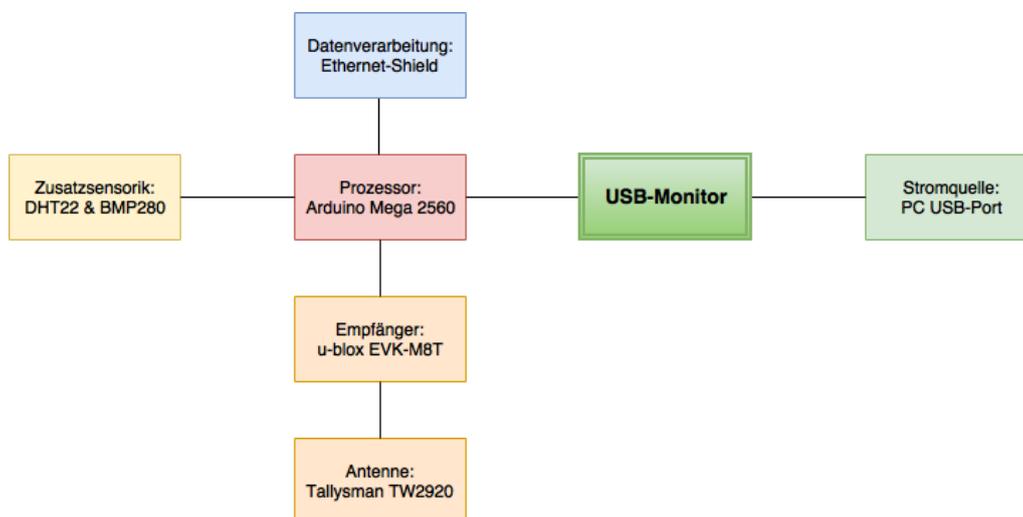


Abbildung 3.1: Messanordnung für die Ermittlung des Energiebedarfs des Systems mit angeschlossenen Komponenten.

Die Ermittlung des Stromverbrauchs wurden bei laufender Messung und Aufzeichnung auf der SD-Karte durchgeführt und ergab

$$5 \text{ V} \cdot 0,29 \text{ A} = 1,45 \text{ W.} \quad (3.1)$$

Dies ergibt einen Verbrauch von

$$0,29 \text{ A} \cdot 24 \text{ h} = 34,8 \text{ Ah} \quad (3.2)$$

beziehungsweise

$$1,45 \text{ W} \cdot 24 \text{ h} = 6,96 \text{ Wh} \quad (3.3)$$

pro Tag. Die Akku-Laufzeit t in Stunden berechnet sich wie folgt

$$t [\text{h}] = \frac{Q [\text{Ah}]}{I [\text{A}]} \cdot \eta, \quad (3.4)$$

wobei Q die Nennkapazität, I die Nennspannung und η den Wirkungsgrad des Akkus angibt. Der Wirkungsgrad ist abhängig vom Akkutyp und kann mit 60 % bis 95 % angenommen werden. (Kurzweil und Dietlmeier, 2015) (Dembowski, 2015)

Soll der Akku eine Laufzeit von mindestens 24 h haben und wird ein Wirkungsgrad des Akkus von 80 % angenommen, so muss die Nennkapazität Q des Akkus

$$\frac{24 \text{ h} \cdot 0,29 \text{ A}}{0,8} = 8,7 \text{ Ah} \quad (3.5)$$

betragen. Wird ein Akku mit einer Kapazität von 10 Ah, dem selben Wirkungsgrad und dem gemessenen Verbrauch von 0,29 A gewählt, so ergibt sich nach Formel 3.4 eine Laufzeit von etwa 27,6 h.

Die Firma *SunnyBAG* bietet ein kombiniertes Produkt aus Solarpanel und Powerbank an, welches speziell für Outdoor-Anwendungen konzipiert wurde und den beschriebenen Anforderungen, wie beispielsweise der Durchgangsladung und dem Überladeschutz, gerecht wird. Abbildung 3.2 zeigt die technischen Spezifikationen sowie die Integration des Solarpanels und der Powerbank an die entwickelte GPS/GNSS-Station. Um den Akku mittels des Solarpanels bestmöglich aufladen zu können, muss dieses möglichst optimal ausgerichtet werden. Über einen Online-Service des Joint Research Centre (JRC)¹, welches eine Forschungseinrichtung der Europäischen Kommission ist, kann für eine spezifiziertere geographische Position die Elevation und das Azimuth abgeschätzt werden. Für das Messdach des IfE ergab dies eine Neigung von 37° und ein Azimuthwinkel

¹ <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>

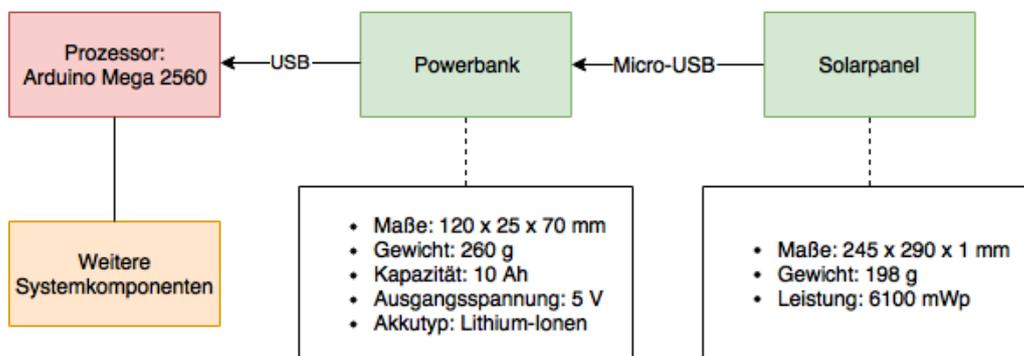


Abbildung 3.2: Integration der Stromversorgung in die entwickelte GPS/GNSS-Station inklusive technischer Spezifikationen

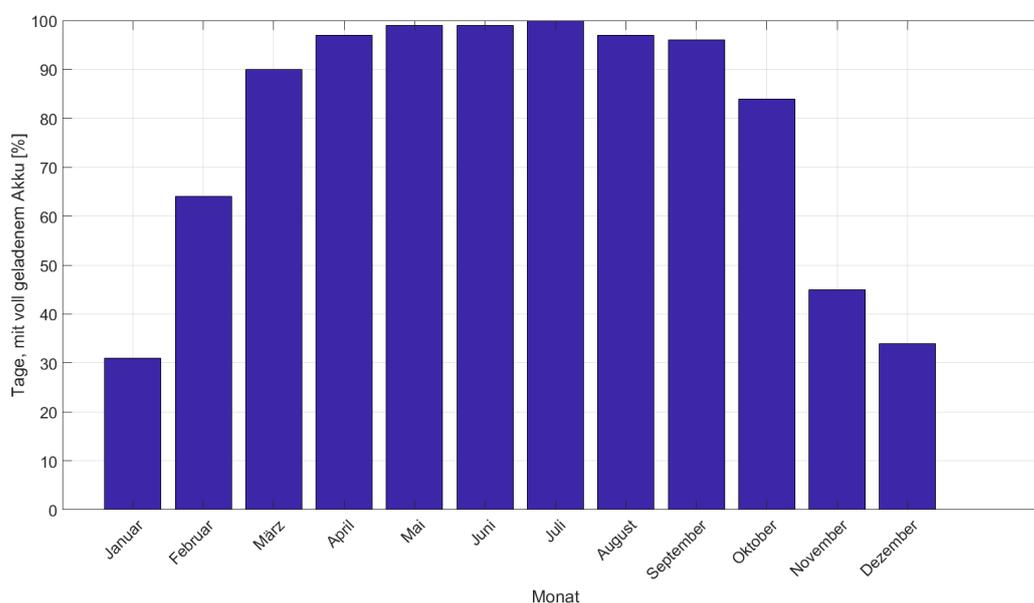


Abbildung 3.3: Anzahl der Tage in einem Monat, an denen der Ladezustand des Akkus bei 100 % liegt.

von -1° , wobei Süden 0° und Osten -90° bedeuten. In European Commission, Joint Research Centre (2014) ist detailliert beschrieben, welche Eingabeparameter gewählt werden können, welche Modelle herangezogen werden und wie die Berechnung erfolgt.

Der Online-Service bietet des weiteren eine Schätzung von autonomen Fotovoltaik-Anlagen an. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte System stellt ein solches dar und somit kann überprüft werden, ob die Kapazität der Powerbank und die Leistung des Solarpanels ausreichen, um den Verbrauch des Systems permanent zu decken. Abbildung 3.3 zeigt exemplarisch den prozentualen Anteil an Tagen pro Monat, an denen der Akku komplett geladen war. Die gewählten Eingabeparameter für die Berechnung sowie weitere, detailliertere Ergebnisse sind im Anhang A ersichtlich. Es zeigt sich in Abbildung 3.3, dass selbst in eher sonnenarmen Monaten, wie beispielsweise im Januar und Dezember, an knapp ein Drittel der Tagen der Ladezustand bei 100 % war. Die Berechnung ergab nach European Commission, Joint Research Centre (2014) außerdem, dass an allen Tagen im Jahr der Akkuzustand nie unter 20 % lag (vgl. Anhang A).

Nach der Zusammenführung des Systems hat sich gezeigt, dass das gelieferte Produkt in der Form ungeeignet ist, da sich die Powerbank komplett abschaltet, sobald die zugeführte Leistung durch das Solarpanel gleich der entnommenen Leistung durch den Arduino ist. Daher wurden für die Testmessungen zunächst Bleibatterien als Parallelschaltung verwendet, um die Messungen über insgesamt vier Tage durchführen zu können.

3.6 Zusammenfassung

Das entwickelte System besteht aus einem u-blox-M8T Receiver, der zum einen zu den gewählten Antennen kompatibel ist und zum anderen das Loggen von Rohdaten möglich macht. Um den GNSS-Datenstream des Empfängers zu verarbeiten wurde ein Arduino-Prozessor gewählt, da dieser einen geringen Stromverbrauch aufweist und unempfindlich gegenüber Stromunterbrechungen ist. Die permanente Stromversorgung wurde zunächst über ein Solarpanel und eine Powerbank realisiert. Allerdings stellte sich hier als problematisch heraus, dass sich die Powerbank komplett ausschaltet, wenn die Powerbank mit etwa der gleichen Stromstärke geladen wird, wie gleichzeitig das System verbraucht. Daher wurde zunächst als Zwischenlösung die Stromversorgung über in parallel geschalteten Batterien sichergestellt. Als zusätzliche Sensoren wurden im System zwei atmosphärische Sensoren verbaut, die die Temperatur, den Luftdruck und die Luftfeuchte messen. Alle Daten werden auf einer 8 GB SD-Karte geloggt und können über einen WebServer abgerufen und heruntergeladen werden. Die gesamten Systemkomponenten werden in einem robusten und wasserfesten Gehäuse untergebracht, das den Einsatz für permanente Outdoor-Anwendungen ermöglicht. Die Ansteuerung des Prozessors und Receivers erfolgt über eine USB 2 Schnittstelle. Außerdem befindet sich an der Außenseite des Gehäuses ein TNC-Antennenanschluss, sodass eine schnelle und flexible Installation der GNSS-Antenne vollzogen werden kann. Somit besteht eine hohe Flexibilität des Systems zur Anpassung an die jeweilige Umgebung. Abbildung 3.4 zeigt das entwickelte System von außen, wobei die Schnittstellen deutlich erkennbar sind, mit denen die hohe Flexibilität erreicht werden kann. In Abbildung 3.5 ist eine schematische Darstellung des Schaltplans mit allen Hardwarekomponenten dargestellt. Abbildung 3.6 zeigt die Innenansicht des Systems. In der oberen Bildhälfte ist der Arduino-Prozessor mit aufgestecktem Ethernet-Shield zu erkennen, in der Mitte als größte Einheit der u-blox Empfänger und in der linken, unteren Ecke des Gehäuses die beiden atmosphärischen Sensoren.



Abbildung 3.4: Außenansicht des entwickelten Systems.

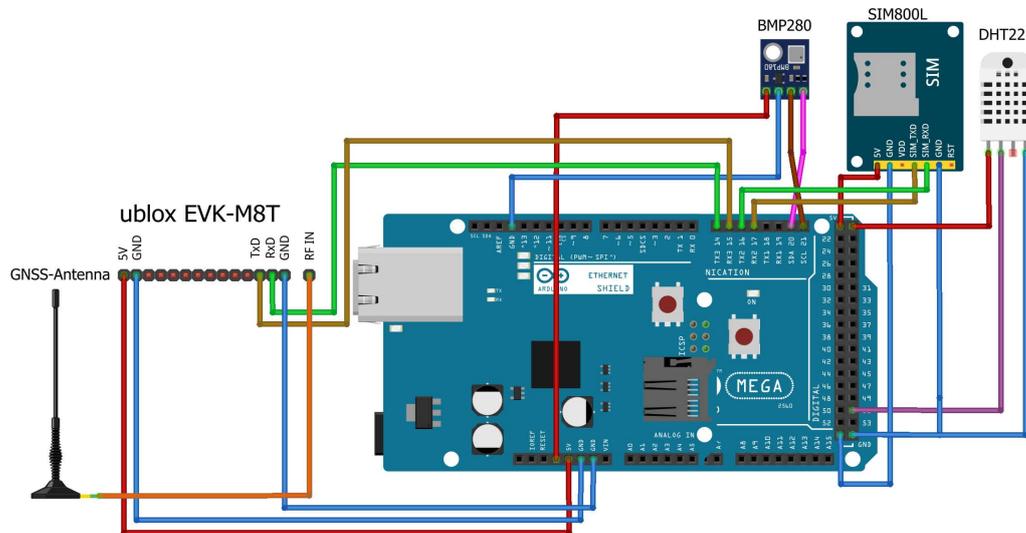


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des Schaltplans, erstellt mit fritzing.org.

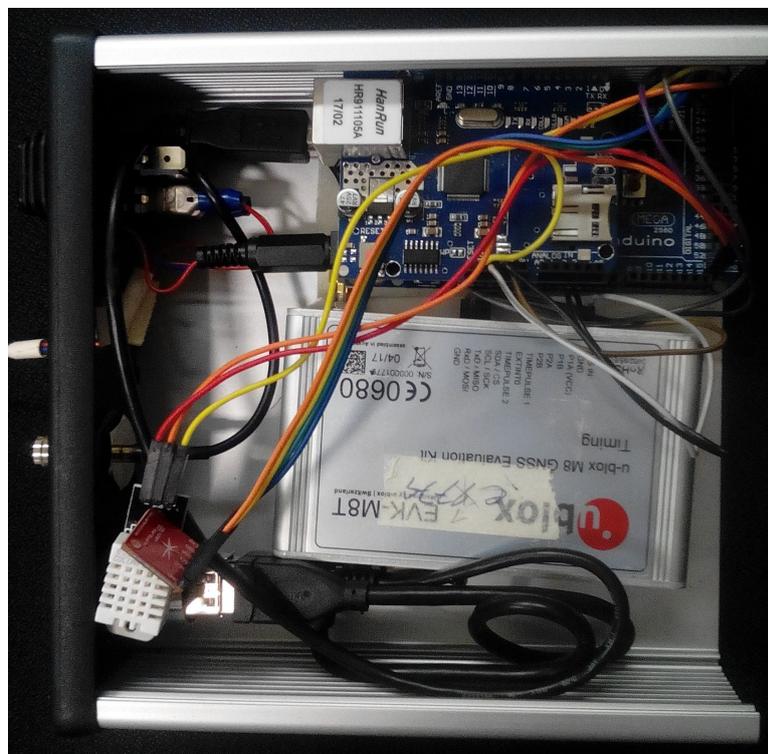


Abbildung 3.6: Innenansicht des entwickelten Systems.

4. ANALYSE DES SYSTEMS UNTER LABORBEDINGUNGEN

Dieses Kapitel beschreibt die Evaluation des entwickelten Prototypen unter Laborbedingungen. Neben der Überprüfung des Datenflusses und der damit einhergehenden gemeinsamen Verarbeitung der GNSS-Daten und den Daten der Zusatzsensorik wird die Performance der gewählten Antennen und des Empfängers auf Grundlage von Koordinatenwiederholbarkeiten, Satellitensichtbarkeiten, Signalstärken sowie Doppeldifferenzen analysiert.

4.1 Messaufbau

Alle Messungen unter Laborbedingungen finden auf dem Messdach des IfE an der Leibniz Universität Hannover statt. Zum einen wird eine Nullbasislinie durch einen Antennensplitter umgesetzt, an dem zwei u-blox-Empfänger sowie ein geodätischer Empfänger angeschlossen sind. Somit kann die Performance der Receiver getestet werden. Die Fragestellung, die in diesem Kontext vor allem beantwortet werden soll, ist, ob die für den Massenmarkt hergestellten u-blox-Empfänger gleichwertige Ergebnisse liefern. Zum anderen wird eine kurze Basislinie realisiert. Hierbei dient eine geodätische Antenne (LEICA AR25) und ein geodätischer Receiver (LEICA GRX1200+GNSS) auf einem Pfeiler des Messdaches (MSD8) als Referenz. Zusätzlich ist hier ebenfalls ein u-blox Empfänger angeschlossen. Außerdem erhalten beide geodätischen Empfänger über einen Oszillator ein konstante Frequenz von 10 MHz.

Um eine städtische Infrastruktur herzustellen, wird auf einen Pfeiler ein Lampenkopf inklusive Stange installiert. Auf den Leuchtkopf wird dann die jeweilige Antenne angebracht. In einem permanenten Betrieb hat diese Position zum einen den Vorteil, dass die Antenne (und eventuell weitere Systemkomponenten) nicht vor Vandalismus geschützt werden müssen und zum anderen, dass sich die Satellitensichtbarkeit verbessern kann, da die Signale nicht so stark durch niedrige Bauten und Vegetationen gestört werden. Außerdem ist es denkbar, dass die Stromversorgung direkt über den Stromkreislauf der Laterne realisiert werden kann. Im Laborversuch soll durch die Anbringung der Antenne auf dem Lampenkopf überprüft werden, ob diese Umgebung einen besonders starken Einfluss auf die Messungen hat.

Um einen eindeutigen Punkt realisieren zu können, an denen die verschiedenen Antennen ausgerichtet werden, wird ein Gitterraster mit einer Auflösung von 1 cm aufgetragen (s. Abb. 4.1a). Der geometrische Mittelpunkt der Antenne wird dann an diesen Punkt, der in der Abbildung in rot dargestellt ist, mittels des Rasters und dem Kabelanschluss ausgerichtet. Abbildung 4.1b zeigt die Laborumgebung sowie die Messkonfiguration auf dem Messdach des IfEs. Die auf den Pfeilern montierten Antennen, die eingesetzten Receiver und die jeweiligen Stationsnamen sind in Tabelle 4.1 gelistet.

Auf Pfeiler B werden mit dem u-blox EVK-M8T 0867 (Tab. 4.1, Zeile 3) mit den einzelnen Antennen zeitgleich zwei Messungen durchgeführt, sodass sich zwei Stationsnamen (0867 und ARDU) ergeben. Dabei werden bei der Station 0867 die Rohdaten direkt über das u-center auf der Festplatte eines Computers gespeichert, wohingegen bei der Station ARDU die Datenaufzeichnung auf der SD-Karte des Ethernet-Shields realisiert wird (vgl. Abschnitt 3.3.2). Dieser Aufbau ist auch in Abbildung 4.3 dargestellt. Durch die Verwendung des selben Receivers (EVK-M8T 0867) für die Stationen 0867 und ARDU kann überprüft werden, ob die Datenaufzeichnung des entwickelten Systems (Station ARDU) fehlerfrei funktioniert.

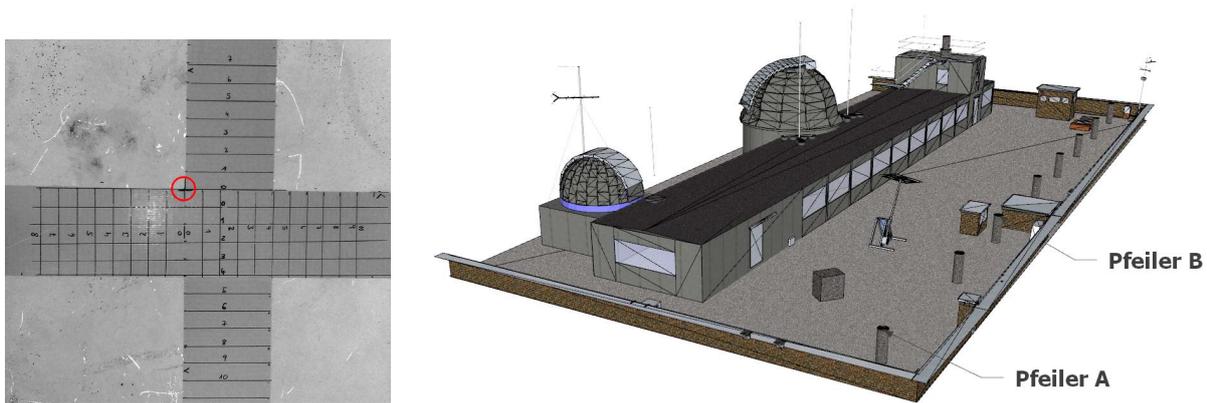


Abbildung 4.1: Darstellung der Messung unter Laborbedingungen, (a) Gitterkreuz auf dem Lampenkopf, mit dem ein eindeutiger Bezugspunkt (roter Kreis) für die Ausrichtung der jeweiligen Antenne hergestellt wird, (b) Ansicht der Laborumgebung und Messkonfiguration auf dem Messdach des IFEs.

Tabelle 4.1: Übersicht der Stationen und dem eingesetzten Equipment.

Pfeiler	Receiver	Stationsname	Antenne
A	LEICA GRX1200+GNSS	MSD8	LEICA AR25
B	LEICA GRX1200+GNSS	LMP6	wechselnd
B	u-blox EVK-M8T 0867	0867, ARDU	wechselnd
B	u-blox EVK-M8T 1779	1779	wechselnd

Alle Messungen wurden aufgrund der siderischen Wiederholbarkeit auf jeweils 48 Stunden angesetzt. Tabelle 4.2 zeigt eine Übersicht der einzelnen angesetzten Sessions, wobei die Aufzeichnungsrate für alle drei Beobachtungssessions bei 10 s liegt.

Für die Analyse unter Laborbedingungen wurden schlussendlich die in Tabelle 4.3 gelisteten Zeiträume ausgewählt, da es zum Teil zu Datenlücken und Synchronisationsproblemen bei der Aufzeichnung der Station ARDU, 1771 sowie 1779 kam.

In Abbildung 4.2 ist der Aufbau der Messung dargestellt. Zum einen ist die auf dem Gitterkreuz ausgerichtete Novatel-Antenne zu sehen, zum anderen zeigt Abbildung 4.2b den Aufbau der Laterne auf Pfeiler B. Aus dem Messaufbau, der in Abbildung 4.3 gezeigt ist, geht hervor, welche geometrischen Kombination in der Auswertung betrachtet werden können (vgl. Tabelle 4.1). So ergeben sich für die Nullbasislinie folgende Kombinationen:

- ▶ LMP6-ARDU, LMP6-0867 sowie LMP6-1779: Vergleich zwischen geodätischem Empfänger (Station LMP6, LEICA) und Low-Cost Empfänger (u-blox)
- ▶ 0867-ARDU: Zur Überprüfung der Datenaufzeichnung des entwickelten Systems (Station ARDU)
- ▶ 0867-1779: Zur Analyse der Leistungsfähigkeit der u-blox Empfänger.

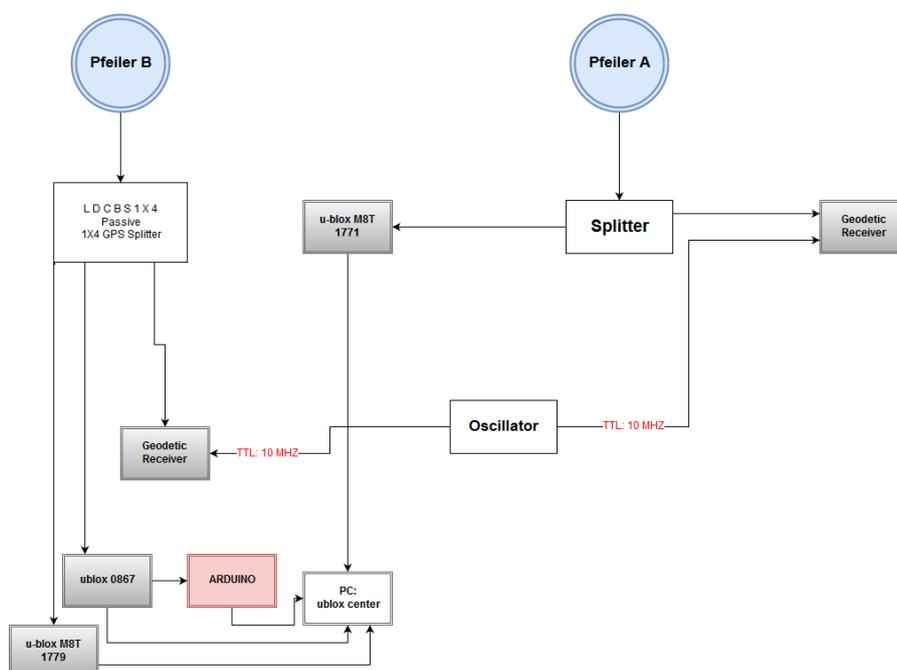
Für die kurze Basislinie ergeben sich die Kombinationen aus zwei geodätischen Empfängern (Basislinie MSD8-LMP6) sowie einen geodätischen und einen Low-cost Empfänger (MSD8-0867, MSD8-ARDU und MSD8-1779).

Tabelle 4.2: Übersicht der einzelnen Sessions.

Session	Antenne	GPS-Woche	Day of week	Day of year (DOY) (2017)
I	Tallysman	1956	4 bis 6	187 bis 189
II	Novatel	1957	3 bis 5	193 bis 195
III	u-blox	1958	1 bis 3	198 bis 200

Tabelle 4.3: Übersicht des Analysezeitraums.

Antenne	DOY 2017	Start (GPS-Zeit)	Ende (GPS-Zeit)	Anzahl der Epochen
Tallysman (TAL)	187	15:00:10	23:59:50	3238
Novatel (NOV)	193	15:00:00	23:59:50	3240
u-blox (PTC)	198	15:00:20	23:59:50	3239

**Abbildung 4.2:** Messung unter Laborbedingungen: (a) Novatel-Antenne (NOV) auf dem Lampenkopf, (b) Aufbau der Lampe auf Pfeiler B.**Abbildung 4.3:** Darstellung des Ablaufs der Messung unter Laborbedingungen auf dem Messdach.

4.2 Analyse der Neukoordinaten

Die Referenzkoordinaten auf der Laterne wurden für die jeweiligen Stationen mittels Leica Geo Office berechnet. Dazu wurden die Daten, die mit dem geodätischen Receiver auf der Station LMP6 aufgezeichnet wurden, präzise Orbits der European Space Agency (ESA) und individuelle Antennenkorrekturen für die Station MSD8 verwendet.

Die Koordinaten wurden über L1-Doppeldifferenzen gelöst, wobei die Station MSD8 fixiert ist. Abbildung 4.4 zeigt die Wiederholbarkeit der ermittelten kartesischen Koordinaten für die drei Stationen ARDU, LMP6 sowie 1779. Für die Stationen ARDU, 0867 (hier nicht dargestellt, da kongruent zu Station ARDU) und 1779 sind die Wiederholbarkeiten mit allen drei Antennen nahezu identisch, woraus sich schlussfolgern lässt, dass die für den Massenmarkt hergestellten u-blox Receiver gleichwertige Ergebnisse liefern. Des weiteren lässt sich erkennen, dass die apriori Standardabweichungen für die Antennen PTC und TAL höher sind, als für die Antenne NOV, was durch das höhere Rauschen der Antennen bedingt wird. Außerdem zeigt die Abbildung 4.4, dass die Ergebnisse mit geodätischem Empfänger (Abb. 4.4b) um etwa Faktor 4 besser sind. Die berechneten Koordinaten und deren Standardabweichungen sind in Tabelle 4.4 für Station ARDU, Tabelle 4.5 für Station LMP6 sowie Tabelle 4.6 für Station 1779 gelistet.

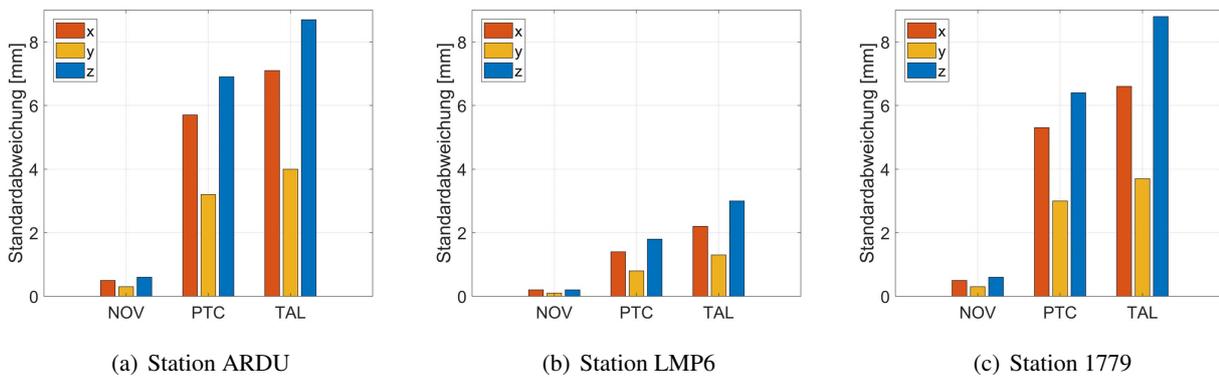


Abbildung 4.4: Standardabweichung der mit Leica Geo Office berechneten kartesischen Koordinaten.

Tabelle 4.4: Berechnete kartesische Koordinaten und deren Standardabweichung für die Station ARDU.

Antenne	X [m]	Y [m]	Z [m]	σ_x [m]	σ_y [m]	σ_z [m]
NOV	3845223,1662	658121,2163	5029191,7309	0,0005	0,0003	0,0006
PTC	3845223,1461	658121,2139	5029191,6994	0,0057	0,0032	0,0069
TAL	3845223,1444	658121,2136	5029191,6972	0,0071	0,0040	0,0085

Tabelle 4.5: Berechnete kartesische Koordinaten und deren Standardabweichung für die Station LMP6.

Antenne	X [m]	Y [m]	Z [m]	σ_x [m]	σ_y [m]	σ_z [m]
NOV	3845223,1656	658121,2169	5029191,7303	0,0002	0,0001	0,0002
PTC	3845223,1454	658121,2132	5029191,6985	0,0014	0,0008	0,0018
TAL	3845223,1442	658121,2126	5029191,6971	0,0022	0,0013	0,0030

Diese Ergebnisse lassen sich bestätigen, wenn die absoluten 2D-Fehlerellipsen (vgl. Abb. 4.5) betrachtet werden. Diese geben den Punktfehler mit einem zweidimensionalen 1-sigma Vertrauensbereich von 39,4 % an, wobei der Maßstab der Ellipsen bei 0,002 liegt.

So besitzen die Fehlerellipsen der mit der NOV und TAL Antenne bestimmten kartesischen Koordinaten für die Stationen ARDU (Abb. 4.5a) und 1779 (Abb. 4.5b) in etwa die selbe Größe und Orientierung. (Nie-

Tabelle 4.6: Berechnete kartesische Koordinaten und deren Standardabweichung für die Station 1779.

Antenne	X [m]	Y [m]	Z [m]	σ_x [m]	σ_y [m]	σ_z [m]
NOV	3845223,1662	658121,2163	5029191,7310	0,0005	0,0003	0,0006
PTC	3845223,1462	658121,2139	5029191,6994	0,0053	0,0030	0,0064
TAL	3845223,1445	658121,2136	5029191,6972	0,0066	0,0037	0,0088

meier, 2008) Auffallend ist, dass die mit NOV bestimmte Koordinate einerseits den geringsten Punktfehler hat, was sich in der kleinen und kreisförmigen Fehlerellipse widerspiegelt, und zum anderen einen deutlichen Offset zu den mit den anderen Antennen bestimmten Koordinaten besitzt.

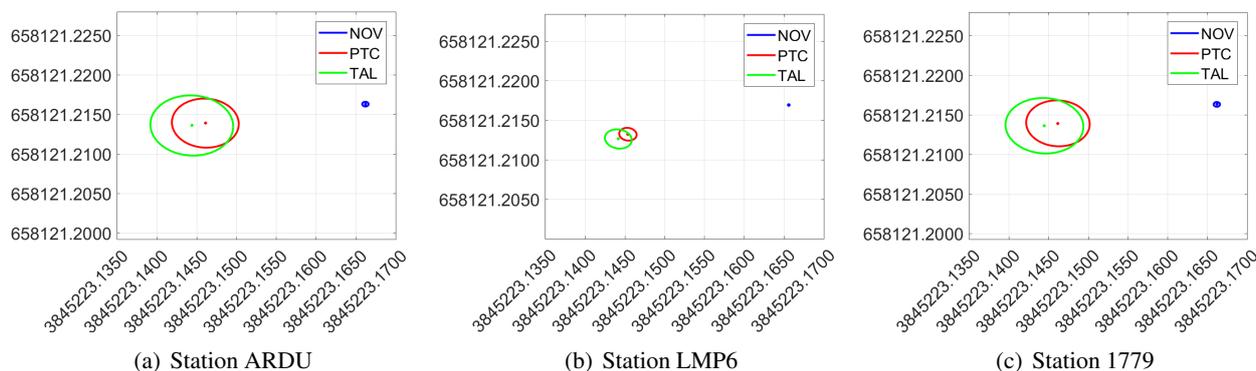


Abbildung 4.5: Absolute Fehlerellipsen der bestimmten Koordinaten für den Referenzpunkt auf der Laterne.

Daher wurden die kartesischen Koordinaten in topozentrische Koordinaten transformiert, um die Koordinatenunterschiede deutlicher herauszustellen, wobei das Topozentrum in die Station LMP6 (NOV-Antenne) gelegt wurden ist.

Für die Transformation der kartesischen Koordinaten (X, Y, Z) in topozentrische Koordinaten (N, E, U) müssen zunächst die geographischen Koordinaten (φ, λ, h) bestimmt werden. Leica Geo Office bietet die Möglichkeit, die berechnete Koordinate als geographische Koordinate auszugeben, sodass diese verwendet wird, um die Transformation in topozentrische Koordinaten nach Formel 4.1 durchzuführen (Hofmann-Wellenhof et al., 2007).

$$\begin{bmatrix} N \\ E \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\varphi)\cos(\lambda) & -\sin(\lambda) & \cos(\varphi)\cos(\lambda) \\ -\sin(\varphi)\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & \cos(\varphi)\sin(\lambda) \\ \cos(\varphi) & 0 & \sin(\varphi) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

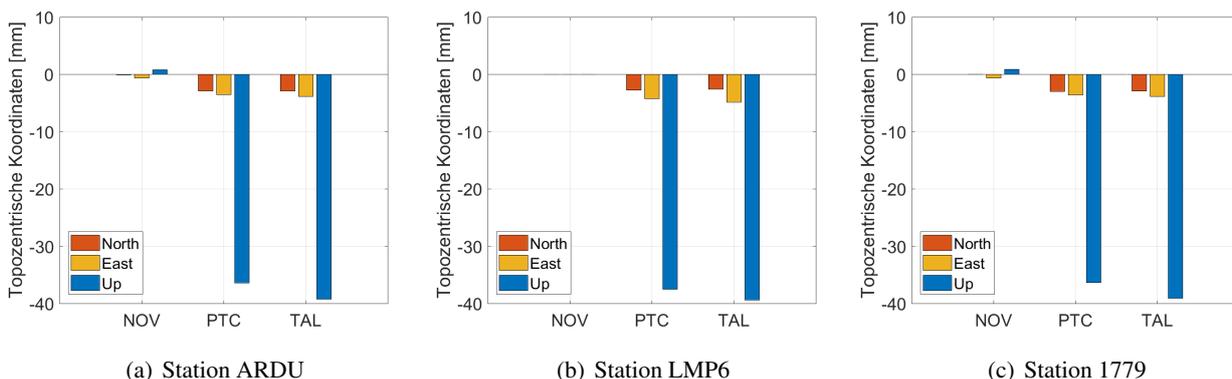


Abbildung 4.6: Topozentrische Koordinaten, gelagert in der Station LMP6 (NOV-Antenne)

Abbildung 4.6 zeigt die topozentrischen Koordinaten für die Stationen ARDU, LMP6 sowie 1779. Wie schon die Standardabweichungen der bestimmten Koordinaten (vgl. Abb. 4.4) zeigen, liefern die Stationen ARDU und 1779 nahezu identische Ergebnisse. Es lässt sich erkennen, dass für die Antennen PTC und TAL für alle Stationen Differenzen in der Nord- und Ostkomponente zu den mit der Novatel-Antenne bestimmten Koordinaten der Station LMP6 von etwa -5 mm auftreten. Die Differenz in der Höhenkomponente liegt bei etwa 37 mm für die PTC-Antenne und 39 mm für die TAL-Antenne. Begründet werden kann dies mit der unterschiedlichen Bauhöhe der Antennen. So besitzt beispielsweise die TAL-Antenne eine Höhe von 15 mm wohingegen die NOV-Antenne eine Bauhöhe von 45 mm aufweist. Wird dieser Offset von 30 mm von den topozentrischen Koordinatendifferenzen der Höhenkomponente subtrahiert, ohne genau den jeweiligen ARP zu berücksichtigen, so liegen die Differenzen bei unter 10 mm. Abbildung 4.7 zeigt die topozentrischen Koordinaten (Topozentrum in der Station LMP6 mit Novatel-Antenne) mit den 2D-Fehlerellipsen. Für die Novatel-Antenne wurde der beim IGS gegebene PCO angebracht (N = -0,2 mm, E = 1,6 mm, U = 37,7 mm). Es bestätigen sich die Annahmen, die bereits bei Abbildung 4.5 getroffen wurde.

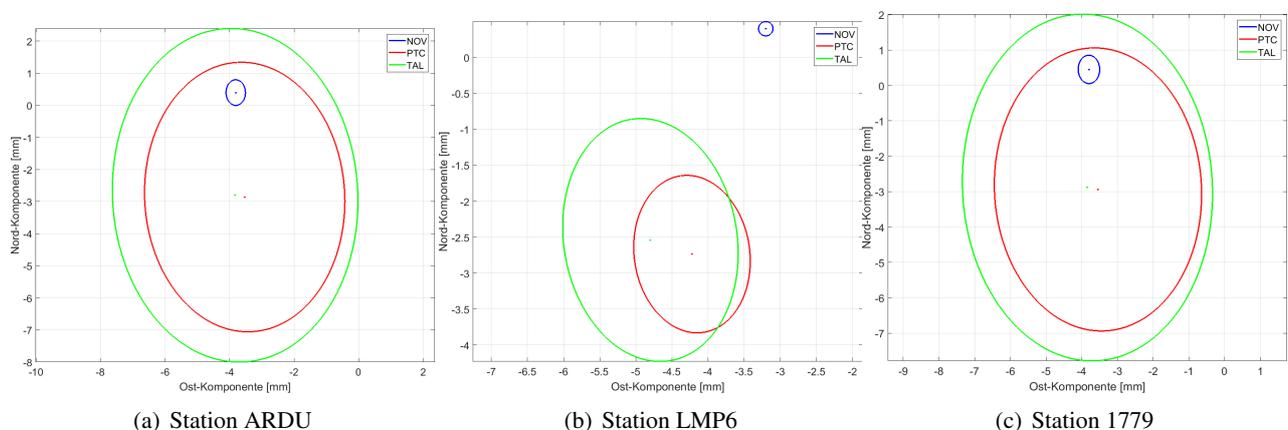


Abbildung 4.7: Topozentrische Koordinaten mit 2D-Fehlerellipsen, gelagert in der Station LMP6 (NOV-Antenne). Für die Novatel-Antenne wurde der beim IGS gegebene PCO angebracht.

So lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Neukoordinaten auf dem Lampenkopf mit der Novatel-Antenne am präzisesten bestimmt werden können. Außerdem ist die Wiederholbarkeit der Koordinate mit geodätischem Empfänger um etwa Faktor 4 besser als mit dem u-blox Low-Cost Empfänger.

Die berechneten Koordinaten auf der Laterne gehen dann als Referenzwerte in die IFE-GNSS-Toolbox ein, mit denen die weiteren Analysen vorgenommen werden.

4.3 Analyse der Satellitensichtbarkeiten

Die Satellitensichtbarkeit (visibility) ist nach Mansfeld (1998) neben der Verfügbarkeit (availability) eines der beiden Begriffe, mit denen die Nutzbarkeit eines Satellitensystems beschrieben werden kann. Mit dem Terminus Sichtbarkeit wird ganz allgemein angegeben, ob ein Satellit für den Nutzer sichtbar ist. Dies bedeutet, dass die Verbindungslinie (Line-of-Sight) vom Nutzer zum Satellit frei von elektromagnetischen Hindernissen ist, welches zum Beispiel die Erdkrümmung oder die Abschattungen durch die Bedeckung der Erdoberfläche (Erhebungen, Bauwerke, etc.) sein können. Die Verfügbarkeit hingegen gibt an, dass die Satelliten sichtbar sind und die Durchführung von Messungen möglich ist. Dies schließt beispielsweise ein, dass die Bestimmung der Position mit einer angegebenen Genauigkeit erfolgen kann. Im Folgenden wird allerdings nur näher auf die Sichtbarkeit eingegangen.

Der Sichtbarkeitswinkel hängt einerseits vom mittleren Wert für den Erdradius ab und andererseits von der Satellitenbahn, insbesondere der Höhe über der Erde. Oftmals wird dieser theoretische Wert nicht verwendet, da die Topographie der Erde die direkte Funkverbindung zwischen Satellit und Nutzer nicht zulässt. Hinzu kommt, dass bei niedrigen Erhebungswinkeln das ausgesendete Signal einen längeren Weg durch die Atmosphäre zurücklegen muss und es somit zu einer stärkeren Laufzeitverzögerung kommt. Außerdem treten

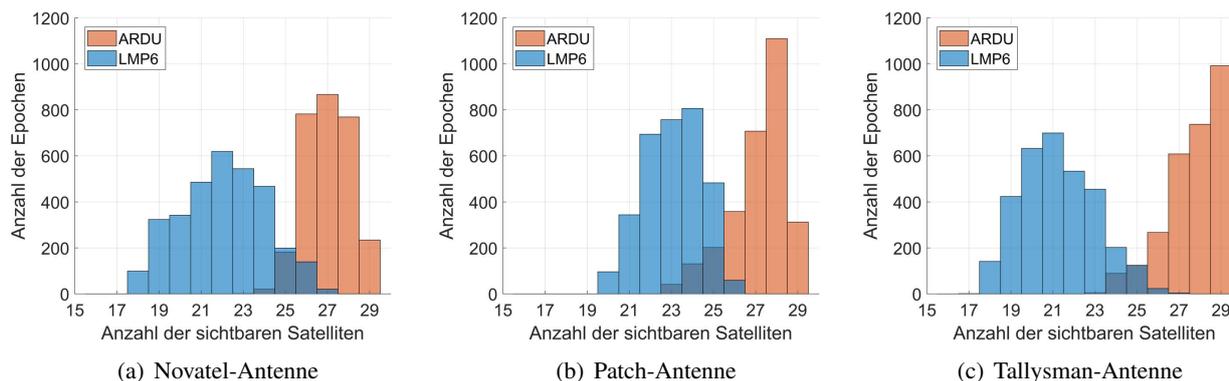


Abbildung 4.8: Anzahl der sichtbaren Satelliten für die Stationen ARDU und LMP6.

Mehrwegeeffekte (Multi-Path) bei geringeren Erhebungswinkeln auf, sodass nach (Mansfeld, 1998) häufig ein minimaler Erhebungswinkel, auch Elevationsmaske genannt, von 5° bis 10° gewählt wird. Für die Messungen unter Laborbedingungen wurde im Empfänger zunächst keine Elevationsmaske eingestellt.

Tabelle 4.7 gibt nach IAC (2017) und European Global Navigation Satellite Systems Agency (2017) einen Überblick darüber, wie viel Satelliten des jeweiligen Systems aktuell in Betrieb sind, um im Folgenden die Anzahl der sichtbaren Satelliten einordnen zu können.

Tabelle 4.7: Gesamtanzahl der Satelliten.

GNSS-System	Gesamtanzahl	in Betrieb
GPS	32	31
GLONASS	25	24
Galileo	18	15

In Abbildung 4.8 sind die Satellitensichtbarkeiten als Histogramm dargestellt, wobei dies die Summen der sichtbaren GPS, GLONASS und Galileo Satelliten für jede der drei Antennen sind. Im Rahmen dieser Arbeit ist festgelegt, dass ein Satellit sichtbar ist, sofern eine gültige C/N_0 -Beobachtung vorliegt.

Es lässt sich erkennen, dass die Station ARDU, die aus einer High-Sensitive Antenne und einem Low-Cost Empfänger besteht, eine durchschnittlich höhere Satellitensichtbarkeit aufweist, als die Kombination aus geodätischem Empfänger und High-Sensitive Antenne (Station LMP6). Außerdem wird deutlich, dass die hochsensitive PTC-Antenne die durchschnittliche höchste Satellitensichtbarkeit, sowohl für die Station ARDU als auch für die Station LMP6, aufweist.

Bei Betrachtung der Kreisdiagramme (Abb. 4.9), in denen dargestellt wird, aus welchen Anteilen sich die Summe der sichtbaren Satelliten (vgl. Abb 4.8) zusammensetzt, wird deutlich, dass die Kombination aus High-Sensitive Antenne und Low-Cost Empfänger (Abb. 4.9a-c) dazu führt, dass im Schnitt mehr Galileo-Satelliten sichtbar sind als bei der Kombination aus geodätischem Empfänger und High-Sensitive Antenne (Abb 4.9d-f).

Dies wird ebenfalls durch Abbildung 4.10 bestätigt, in der exemplarisch die Satellitenanzahl als gestapeltes Histogramm für die Stationen ARDU und LMP6 mit montierter Novatel-Antenne dargestellt ist. Auffällig sind hierbei die insgesamt 384 Datenlücken, die bei der Aufzeichnung des Arduinos mit Novatel-Antenne entstanden sind. Dadurch, dass diese recht regelmäßig auftreten (im Schnitt etwa alle 80 Sekunden), entsteht der diskontinuierliche Verlauf (vgl. Abb. 4.10a). Allerdings liegt die Ursache hierfür nicht an der Antenne, da für diese Station mit Tallysman-Antenne (417) und mit Patch-Antenne (378) gleichermaßen Datenlücken auftreten, sondern an der fehlerhaften Datenaufzeichnung mit dem Arduino.

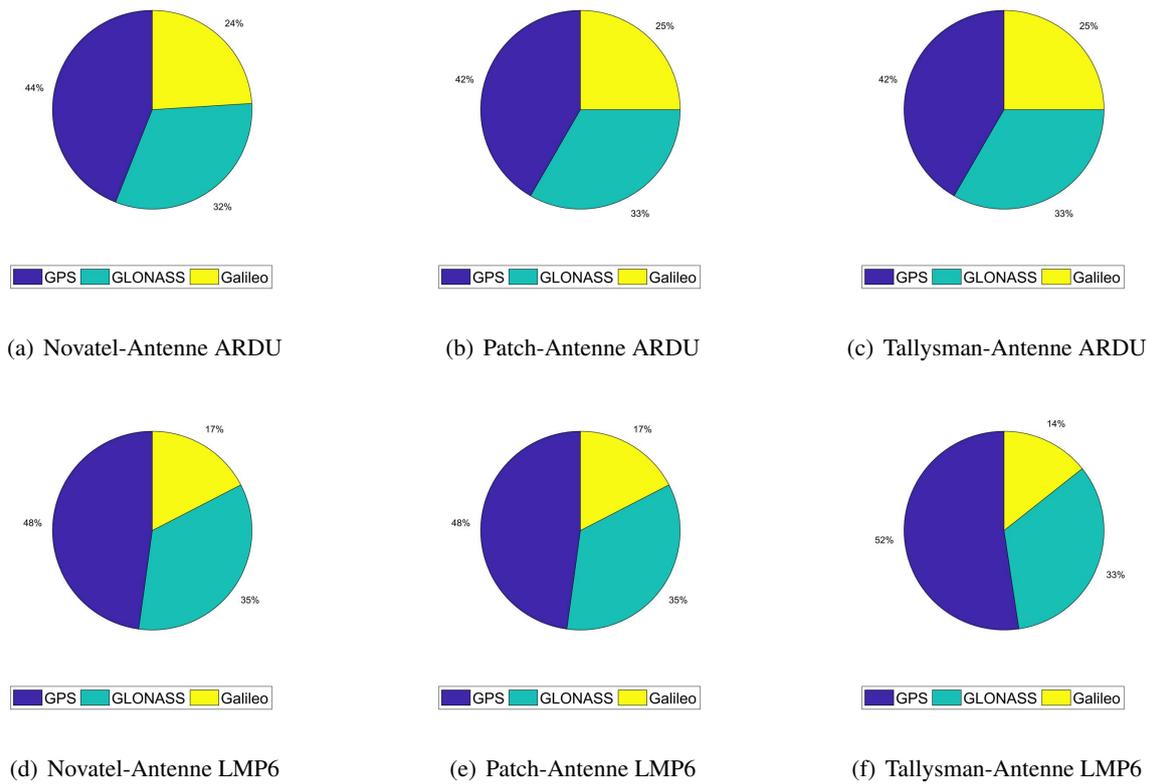


Abbildung 4.9: Anzahl der sichtbaren Satelliten für die Stationen ARDU (a-c) und LMP6 (d-f)

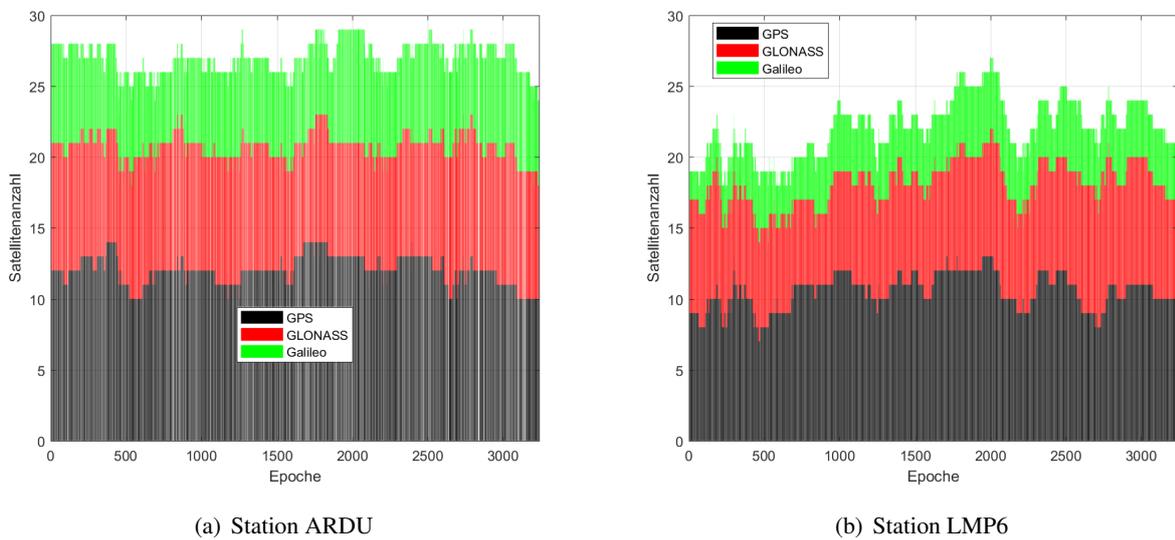


Abbildung 4.10: Anzahl der sichtbaren Satelliten mit montierter Novatel-Antenne.

4.4 Analyse der Signalstärken

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Signalstärken C/N_0 (Carrier-to-noise power density ratio) analysiert. Diese geben das Träger-Rausch-Verhältnis an, sodass die Signalstärke des empfangenen Signals bewertet werden kann, wobei nach Hofmann-Wellenhof et al. (2007) ein C/N_0 unter 34 dB-Hz ein schwaches Signal kennzeichnet.

Die verschiedenen Satellitensysteme, für die die Antenne und der Empfänger sensitiv sind, senden auf unterschiedlichen Frequenzen (vgl. Tab. 4.9). Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Kürzel für die unter-

schiedlichen Beobachtungen der Signalstärke folgen den Codes, die in der RINEX-Beschreibung Version 3.03 spezifiziert sind. Tabelle 4.8 stellt die im Folgenden verwendeten Signalstärken und deren Kürzel dar.

Tabelle 4.8: Übersicht der verwendeten Signalstärken.

GNSS-System	Frequenzband	Kanal oder Code	Kürzel der Signalstärke
GPS (G)	L1	C/A	GS1C
GLONASS (R)	G1	C/A	RS1C
Galileo (E)	E1	B+C	ES1C

In Abbildung 4.11 sind die durchschnittlichen Signalstärken gegenüber der Elevation für die Stationen ARDU und LMP6 dargestellt. Ermittelt wurde diese durch das Schätzen einer kubischen Funktion über die Messwerte, sodass der zum Teil zackige und sprunghafte Verlauf der Kurven unter anderem durch Interpolationsfehler begründet werden kann. Außerdem wurde die durch die Messwerte geschätzte Funktion in Elevationschritten von 1° ausgewertet, sodass der zackige Verlauf auch hierdurch entsteht.

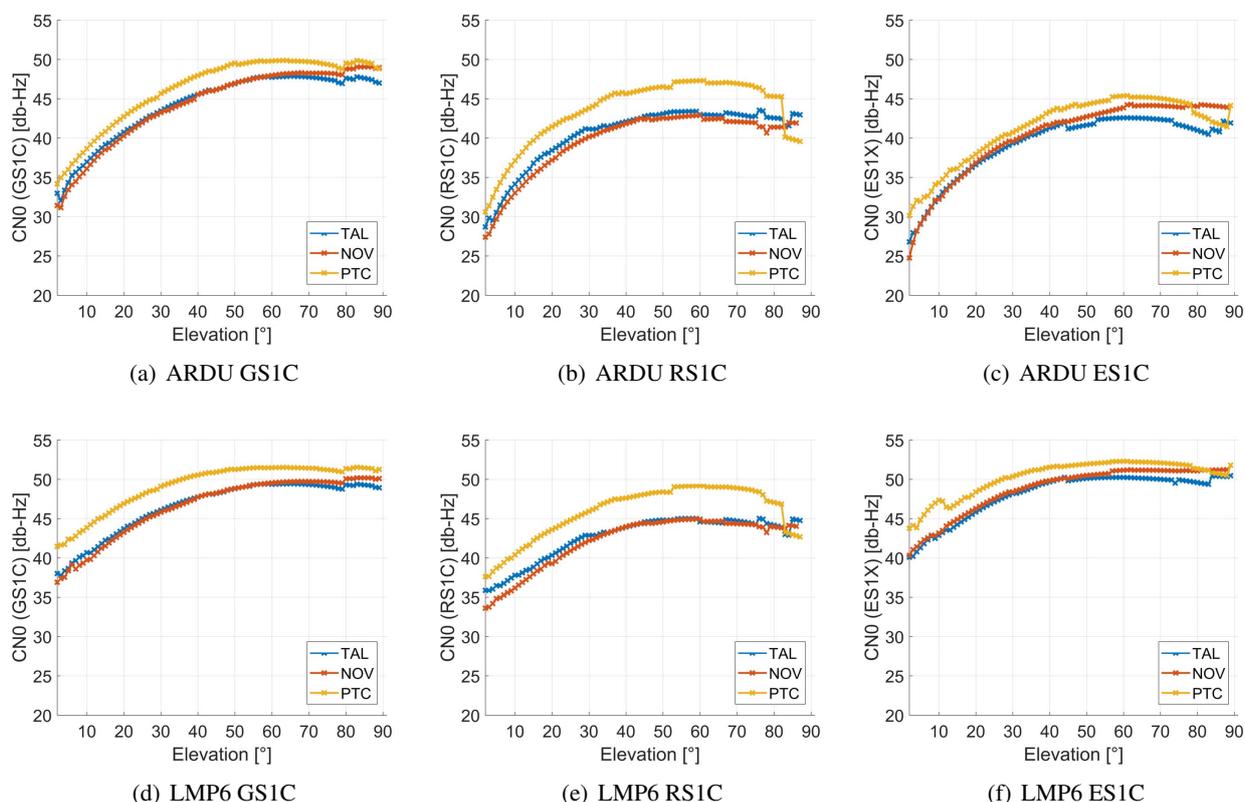


Abbildung 4.11: Darstellung der durchschnittlichen Signalstärken für die Stationen ARDU und LMP6.

Zunächst fällt auf, dass die Signalstärke für alle Signale und Antennen für die Station LMP6 (Abb. 4.11d-f) höher ist als für die Station ARDU (Abb. 4.11a-c). Grund hierfür sind die verschiedenen Tracking-Algorithmen der Low-Cost Empfänger (Station ARDU) und geodätischen Empfängern (Station LMP6). Im Durchschnitt liegen die Signalstärken bei Station LMP6 um etwa 5 dB-Hz über den der Station ARDU. Lediglich für die Signalstärke des EL1C-Signals (Abb. 4.11c und Abb. 4.11f) liegt die Signalstärke bei Station LMP6 um etwa 15 dB-Hz über der Signalstärke der Station ARDU. Außerdem lässt sich feststellen, dass mit der High-Sensitive Patch-Antenne grundsätzlich eine höhere Signalstärke erreicht wird als mit der Tallysman- oder Novatel-Antenne, bei denen die Signalstärke recht ähnlich sind.

Prinzipiell steigen die Signalstärken mit der Elevation, was was das Gain-Pattern zurückzuführen ist. Allerdings lassen sich zum Teil Sprünge bei einer Elevation von etwa 80° feststellen.

Bei Betrachtung der Signalstärke-Skyplots in Abbildung 4.12 für das GS1C-Signal mit montierter Novatel-Antenne für die Stationen ARDU und LMP6 wird deutlich, dass der Grund des Sprunges bei Satellit 12 liegt. Dieser weist eine hohe Signalstärke von etwa 45 dB-Hz auf und ist von den beiden genannten Stationen bis zu einer Elevation von $78,5^\circ$ sichtbar, sodass anschließend die durchschnittliche Signalstärke etwas abfällt. Aus Abbildung 4.12 lassen sich auch die Schlussfolgerungen aus Abschnitt 4.3 belegen, dass die Kombination aus High-Sensitive Antenne und Low-cost Empfänger zu einer durchschnittlich höheren Satellitensichtbarkeit führt, als die Kombination aus High-Sensitive Antenne und geodätischem Empfänger. So sind für den ersten Fall (Abb. 4.12a) auch Satelliten sichtbar, die eine geringe Elevation sowie ein geringes C/N_0 aufweisen.

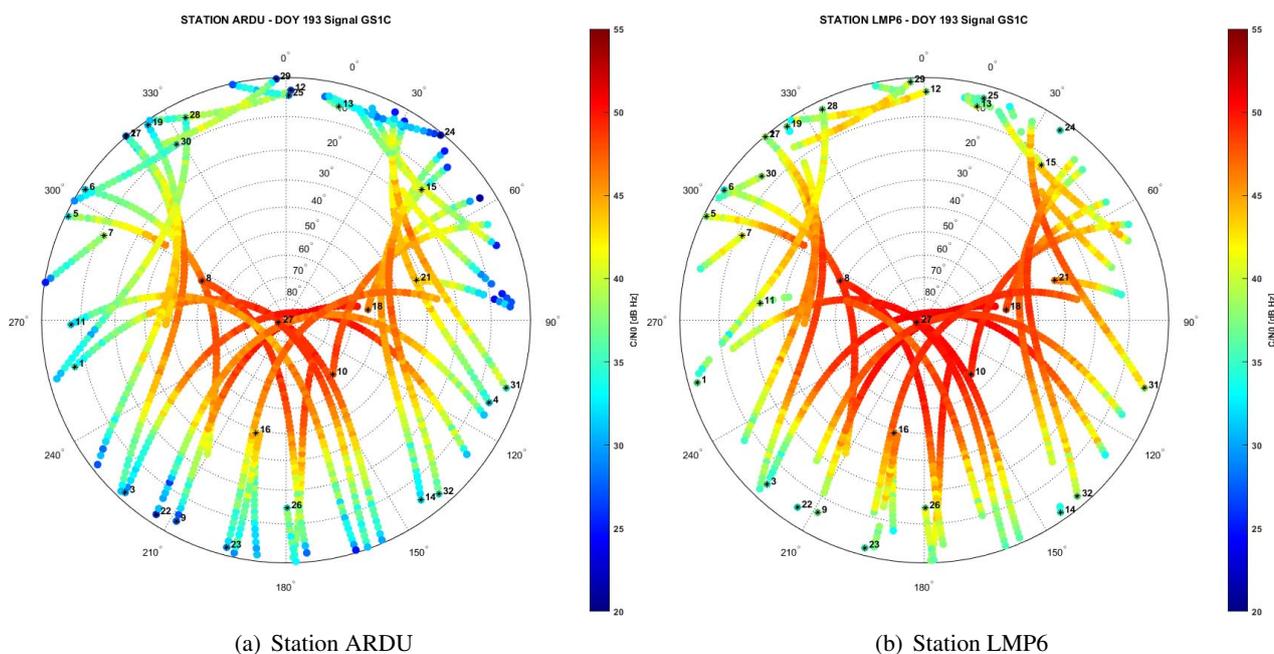


Abbildung 4.12: Signalstärke-Skyplot mit montierter Novatel-Antenne (GS1C-Signal).

Abbildung 4.13 zeigt beispielhaft die maximale und minimale Signalstärke (GS1C) mit montierter Novatel-Antenne für die Stationen ARDU und LMP6. Hierbei wird deutlich, dass der Low-Cost Empfänger auch Signale mit einer geringen Signalstärke trackt, da das Minimum der Signalstärke bei der Station ARDU für alle GPS-Satelliten deutlich unter dem der Station LMP6 liegt (vgl. Abb. 4.13a). Bei der maximale Signalstärke (vgl. Abb. 4.13b) ist hingegen kein größerer Unterschied zwischen der Station ARDU und LMP6 erkennbar, wenngleich die maximale Signalstärke der Station LMP6 leicht höher ist.

In Abbildung 4.14 sind exemplarisch die GPS-Signalstärken der Session II (Tallysman-Antenne) gegenüber der Elevation für die Stationen ARDU, LMP6 und 1779 dargestellt. Zunächst fällt der deutlich kräftigere Verlauf der Station LMP6 auf. Grund hierfür sind die unterschiedlichen Auflösungen für die Signalstärke. Die u-blox-Receiver (vgl. Abb. 4.14a+c) zeichnen die C/N_0 mit einer Auflösung von 1 dB-Hz auf, die LEICA-Empfänger mit einer Auflösung von 0,1 dB-Hz. Anhand dieser Abbildung kann noch einmal verdeutlicht werden, dass sich aus der Kombination aus High-Sensitive Antenne und Low-Cost Empfänger gerade in niedrigen Elevationen eine höhere Anzahl an sichtbaren Satelliten – auch mit einer nach Hofmann-Wellenhop et al. (2007) schwachen Signalstärke – ergeben, wobei dies allerdings die Wahrscheinlichkeit an Mehrwegeeffekten steigert. Außerdem wird deutlich, dass die baugleichen u-blox Empfänger eine ähnliche Performance liefern, da die Signalstärken der Station ARDU sowie 1779 einen nahezu identischen Verlauf aufweisen.

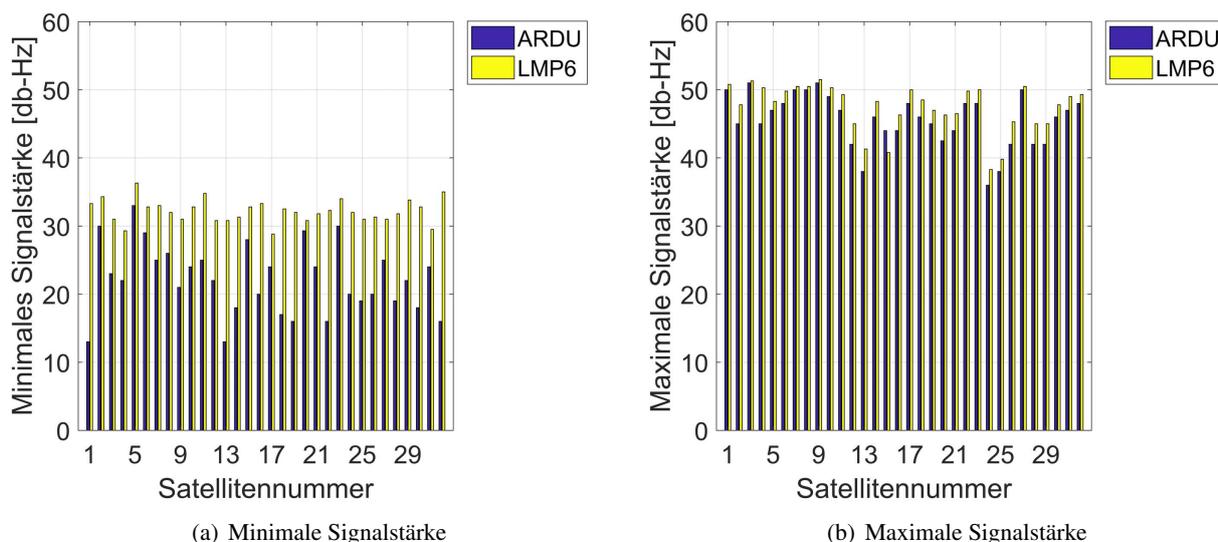


Abbildung 4.13: Minimale und maximale Signalstärke mit montierter Novatel-Antenne (GS1C).

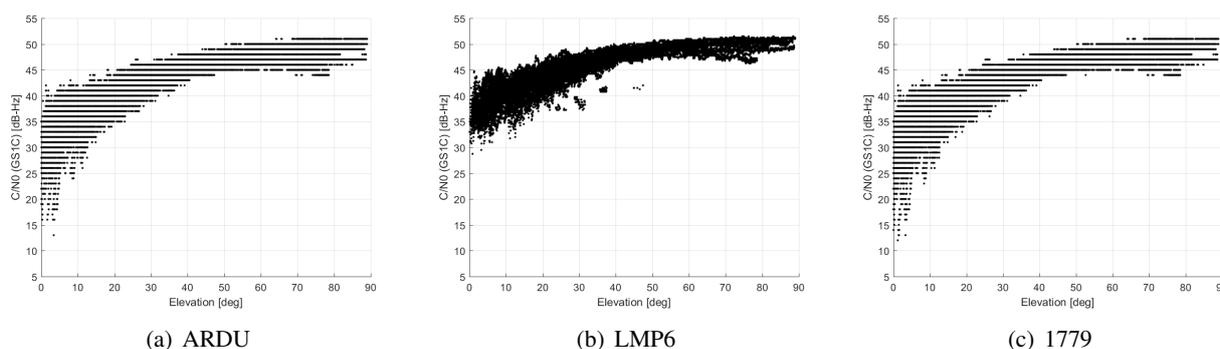


Abbildung 4.14: Darstellung der GPS-Signalstärken gegenüber der Elevation für Session II.

4.5 Analyse der Doppeldifferenzen

Durch Differenzbildung der Trägerphasenmessungen Φ von zwei Stationen (A und B) und zwei Satelliten (i und k)

$$\Phi_{AB}^{ik} = \Phi_A^i - \Phi_B^i - (\Phi_A^k - \Phi_B^k) \tag{4.2}$$

$$\Phi_{AB}^{ik} = \Phi_{A,B}^{i,j} + \lambda N_{A,B}^{i,j} + \epsilon_{A,B}^{i,j} \tag{4.3}$$

können für kurze Basislinien nach Hofmann-Wellenhof et al. (2007) und Misra und Enge (2012) zahlreiche Fehlereinflüsse eliminiert beziehungsweise reduziert werden. Dabei setzen sich die Doppeldifferenzen neben der Trägerphasenmessung Φ aus der ganzzahligen Mehrdeutigkeit λ und dem Messrauschen ϵ zusammen, wobei dieses durch die Differenzbildung um Faktor zwei erhöht wird. Durch die Bildung der Doppeldifferenzen wird neben der Eliminierung des Empfänger - und Satellitenuhrfehlers auch eine Reduzierung der atmosphärischen Laufzeitverzögerung, hervorgerufen durch die Ionosphäre und Troposphäre, der Satellitenbahnfehler sowie der relativistischen Effekte erreicht.

Für die Berechnung der Doppeldifferenzen wird ein Referenzsatellit ausgewählt, der eine Elevation von mindestens 30° aufweist. Außerdem werden kurze Bögen (short arcs unter 1000 s) entfernt und die ganzzahligen Mehrdeutigkeiten für jeden Beobachtungstypen sowie für jeden Satelliten nach Formel 4.4 berechnet und anschließend von den Doppeldifferenzen DD subtrahiert, wobei λ die Wellenlänge der Trägerphase und \overline{DD} den Mittelwert eines Satellitenbogens angibt.

$$DD_0 = DD - \text{round} \left(\frac{DD}{\lambda} \right) \cdot \lambda \quad (4.4)$$

Dadurch können auch Cycle Slips, die entstehen wenn ein Signalabbruch zum Verlust der ganzzahligen Phasenmehrdeutigkeit führt, behoben werden, indem ab einer gewissen Differenz ein neuer Satellitenbogen angenommen wird. Außerdem werden eventuell in den Doppeldifferenzen enthaltende Ausreißer mittels eines Ausreißertests (gleitender Mittelwert mit einer Fensterbreite von 500) eliminiert, um aussagekräftige statistische Beurteilungen tätigen zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die L1-Signale der Satellitensysteme GPS, GLONASS und Galileo untersucht (vgl. Kapitel 4.1). Wie schon bei den analysierten Signalstärken (vgl. Kapitel 4.4), werden die Kürzel für die jeweiligen Signale verwendet, die in der RINEX Version 3.03 spezifiziert sind. Tabelle 4.9 gibt einen kurzen Überblick über die verschiedenen Frequenzen und Wellenlängen. Details sind unter anderem in Hofmann-Wellenhof et al. (2007) und Misra und Enge (2012) zu finden. Während bei GPS und Galileo alle Satelliten

Tabelle 4.9: Übersicht der verwendeten Satellitensignale.

GNSS-System	Frequenzband	Frequenz [MHz]	Kanal/Code	Wellenlänge [cm]	Signalkürzel
GPS (G)	L1	1575,42	C/A	19,0	GL1C
GLONASS (R)	G1	1602 + 0,5625 · k	C/A	18,7	RL1C
Galileo (E)	E1	1575,42	E1A	19,0	EL1C

auf der selben Frequenz senden und die Unterscheidung der einzelnen Satelliten mittels des Code Division Multiple Access (CDMA) geschieht, wird bei GLONASS die Unterscheidung durch den Frequency Division Multiple Access (FDMA) realisiert. Hierbei senden alle GLONASS-Satelliten auf einer eigenen Frequenz, die für die L1-Trägerphase nach Hofmann-Wellenhof et al. (2007)

$$L1 = 1602 + 0,5625 \cdot k \text{ [MHz]} \quad (4.5)$$

lautet, wobei k (mit k = -7, -6, ..., +6) den Frequenzkanal angibt. Die Anzahl der Kanäle ist ausreichend, da Satelliten in antipodalen Positionen die selbe Kanalnummer besitzen. Dies stellt in der Praxis kein Problem dar, da Empfänger auf der Erde die Signale von beiden Satelliten nie gleichzeitig empfangen können (Hofmann-Wellenhof et al., 2007).

4.5.1 Nullbasislinie

Die Nullbasislinie wird durch einen Antennensplitter umgesetzt, an dem für jede Session vier Empfänger angeschlossen werden (vgl. Tabelle 4.1), sodass die Receiverperformance überprüft werden kann. Zunächst werden die Doppeldifferenzen gegenüber der Epochen dargestellt (Aufzeichnungsrate 10 s), wobei alle Darstellungen nach den jeweiligen Satelliten farbcodiert sind. Anschließend werden verschiedene statistische Methoden verwendet, um die Doppeldifferenzen detaillierter analysieren zu können.

Abbildung 4.15 zeigt die Doppeldifferenzen der Basislinie ARDU-LMP6 (4.15a-c) sowie 0867-LMP6 (4.15d-f) mit montierter Novatel-Antenne. Der Verlauf der Doppeldifferenzen für das GL1C-Signal ist für beide Basislinien konstant und sehr identisch. Dies spiegelt sich auch in den Standardabweichungen der Doppeldifferenzen wider, die für beide Basislinien bei 0,66 mm liegt.

Werden die RS1C-Doppeldifferenzen für diese beiden Basislinien betrachtet (Abb. 4.15b und 4.15e), so fällt auf, dass der Verlauf unruhiger und das Rauschen deutlich höher ist. So liegt die Standardabweichung für die Doppeldifferenzen der Basislinie ARDU-LMP6 für die GLONASS-Beobachtungen um Faktor 2,6 beziehungsweise Faktor 4 für Basislinie 0867-LMP6 über den der GPS-Beobachtungen.

Der Verlauf der Doppeldifferenzen für das Galileo-Signals ist recht stabil und ähnelt denen des GL1C-Signals. So liegen die Standardabweichungen knapp über diesem bei jeweils 0,79 mm (Abb. 4.15c und 4.15f).

In Abbildung 4.16 sind die Doppeldifferenzen mit montierter Tallysman-Antenne dargestellt. Wie bei montierter Novatel-Antenne (vgl. Abb. 4.15) ist der Verlauf der Doppeldifferenzen des GL1C-Signals (4.16a und

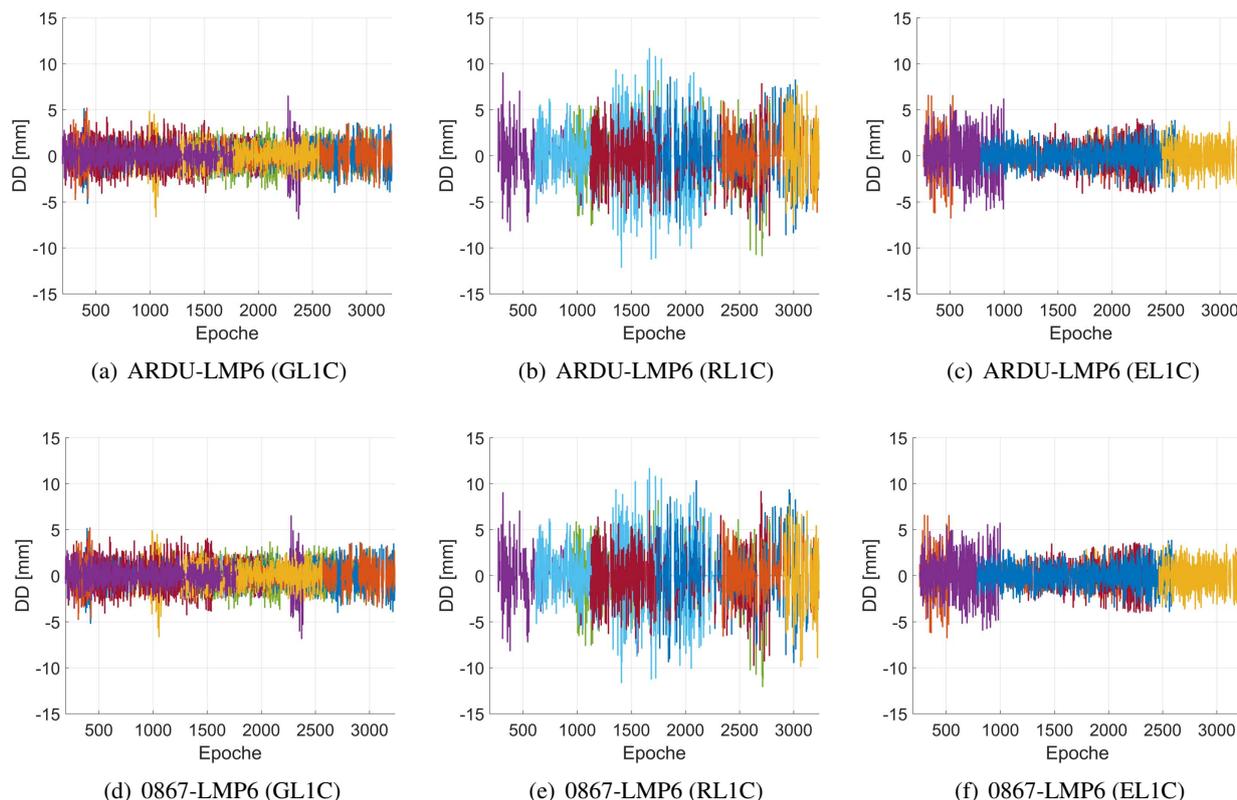


Abbildung 4.15: Nullbasislinienauswertung mit montierter Novatel-Antenne.

4.16d) am stabilsten und das Rauschen des RL1C-Signals (4.16b und 4.16e) am größten. So liegen die Standardabweichungen für die Basislinie ARDU-LMP6 bei 0,7 mm beziehungsweise bei 1,23 mm, für die Basislinie 0867-LMP6 bei 0,68 mm beziehungsweise bei 1,27 mm.

Auffällig für das EL1C-Signal ist die vorhandene Datenlücke am Anfang des Beobachtungszeitraums bis Epoche 539 für beide Basislinien. Grund hierfür ist, dass die Routine zur Berechnung der Doppeldifferenzen Satellit 18 als Referenzsatellit ausgewählt hat, obwohl dieser nicht sichtbar ist. Die Standardabweichung für beide Basislinie liegt bei etwa 1 mm.

In Abbildung 4.17 sind die Doppeldifferenzen mit montierter Patch-Antenne abgebildet. Analog zu den anderen beiden Antennen ist das Rauschen für das GL1C-Signal für beide Basislinien am geringsten und nahezu identisch (Abb. 4.17a und 4.17d). So betragen hier die Standardabweichungen 0,59 mm für beide Basislinien.

Das Rauschen der RL1C-Doppeldifferenzen ist leicht höher als für das GL1C-Signal, allerdings geringer als bei der Novatel- beziehungsweise Tallysman-Antenne, sodass die Standardabweichung 0,8 mm beträgt.

Beim EL1C-Signal sind für beide Basislinien (4.17c und 4.17f) Datenlücken erkennbar. So sind bis zur Epoche 608 gar keine Daten vorhanden. Von Epoche 609 bis Epoche 1300 liegen alle Doppeldifferenzen bei 0 mm, wobei hierbei auch viele kleine Datenlücken vorhanden sind.

Zusammenfassend lässt sich bereits sagen, dass die beiden u-blox Empfänger nahezu identische Ergebnisse liefern. Bemerkenswert ist außerdem, dass mit der Patch-Antenne das Rauschen der Doppeldifferenzen für alle drei Signale am geringsten und für beide Basislinien die Standardabweichung übereinstimmend sind. Grund hierfür dürfte sein, dass die für den u-blox im Lieferumfang enthaltene Patch-Antenne optimal für diesen Empfänger abgestimmt ist. Nichtsdestotrotz stellen die Datenlücken in den EL1C-Doppeldifferenzen mit montierter Patch-Antenne eine Einbuße der Leistungsfähigkeit dar.

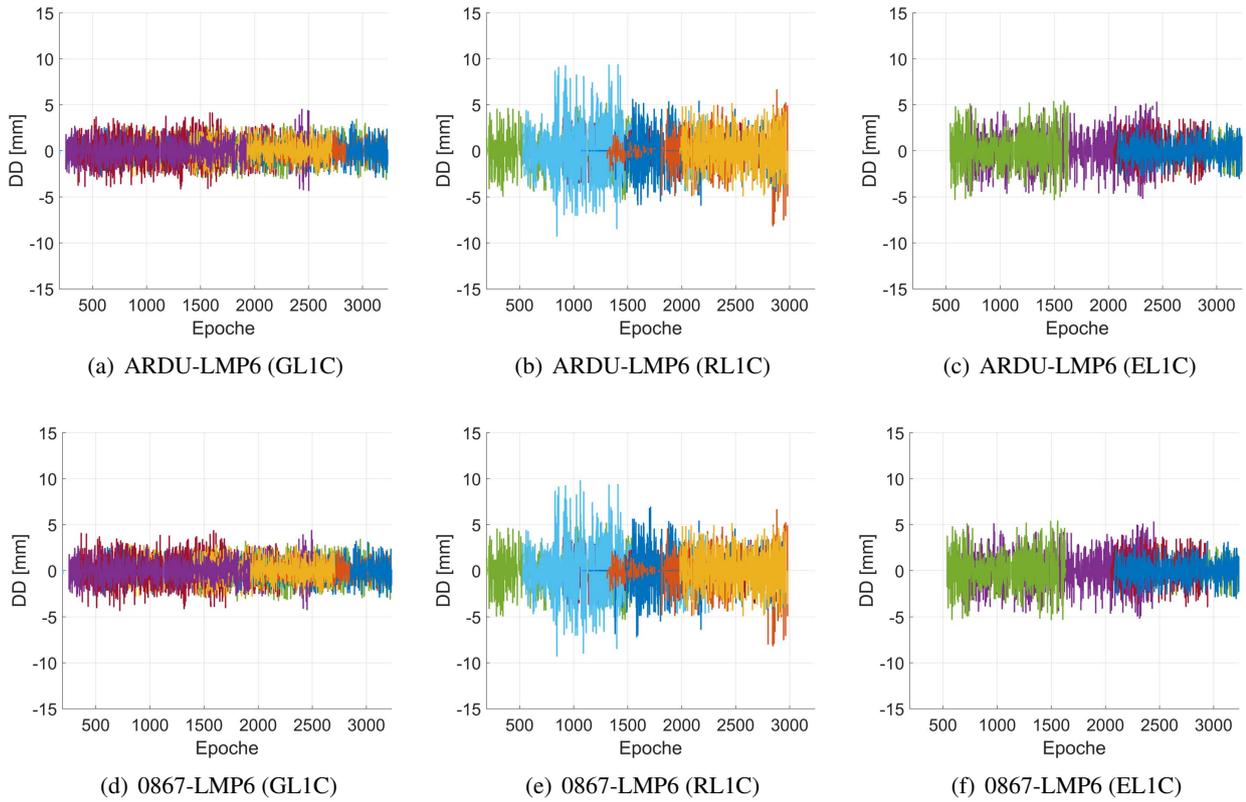


Abbildung 4.16: Nullbasislinienauswertung mit montierter Tallysman-Antenne.

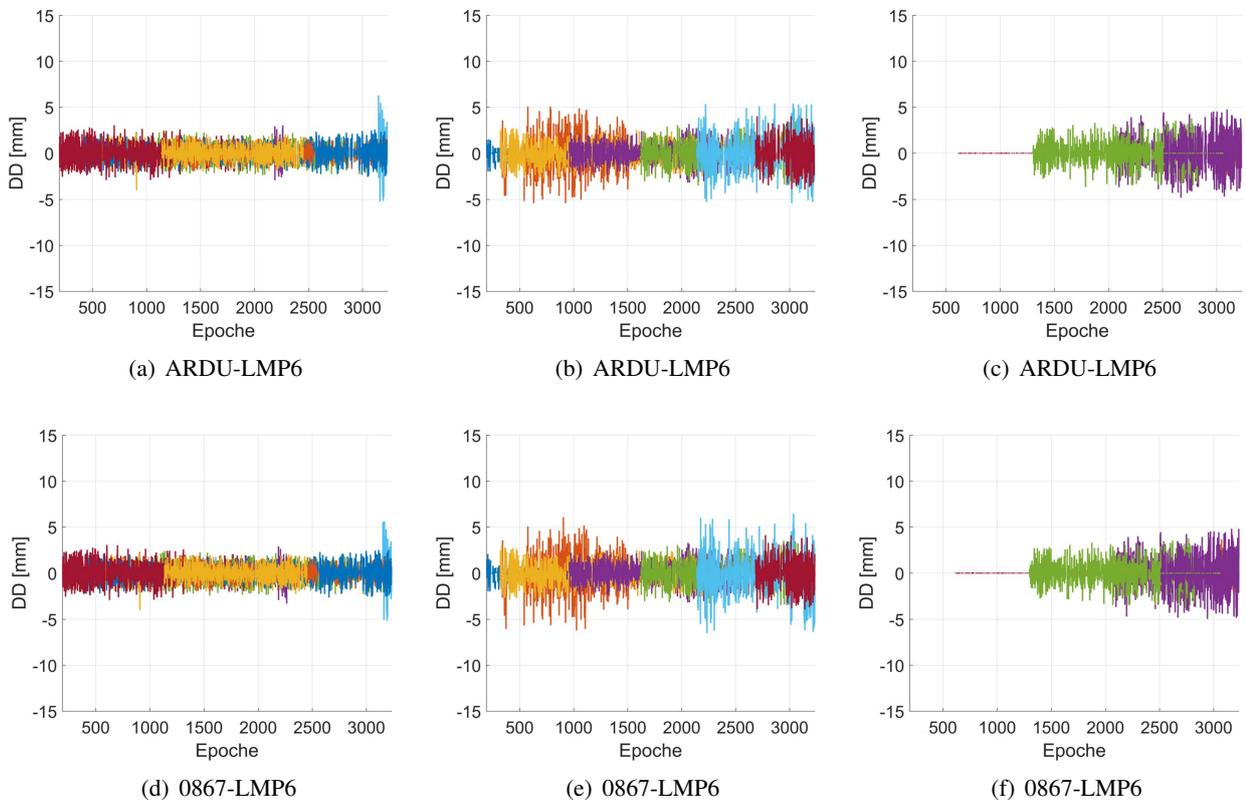


Abbildung 4.17: Nullbasislinienauswertung mit montierter Patch-Antenne.

Abbildung 4.18 zeigt die kumulativen Histogramme für die Basislinie ARDU-LMP6. Diese geben die prozentuale Verteilung der Messwerte an, sodass beispielsweise der Anteil der Messwerte bestimmt werden kann, die unter dem Phasenrauschen des jeweiligen Signals liegen. Das Phasenrauschen kann mit etwa einem Prozent der Wellenlänge angegeben werden (vgl. Tabelle 4.9) und wird in Abbildung 4.18 durch die grüne Gerade visualisiert. Es fällt auf, dass für das GL1C-Signal (Abb. 4.18a) für alle drei Antennen eine nahezu identische Verteilung der Doppeldifferenzen vorliegt und dass 99 % der Messwerte unter dem Phasenrauschen liegen. Dies deckt sich mit den abgebildeten Doppeldifferenzen.

Abbildung 4.18b zeigt auf, dass für das RL1C-Signal die berechneten Doppeldifferenzen stark abhängig von der eingesetzten Antenne sind. Die besten Ergebnisse werden hierbei mit der Patch-Antenne erzielt, die größten Doppeldifferenzen treten bei der Novatel-Antenne auf. So liegen bei dieser Antenne 78,94 % der Messwerte unter dem Phasenrauschen, wohingegen es bei der Tallysman-Antenne 88,5 % und bei der Patch-Antenne 98,4 % sind. Grund hierfür ist der Inter-frequency bias (IFB), der durch den FDMA der GLONASS-Signale hervorgerufen wird und sich für die Empfänger verschiedener Hersteller unterscheidet, wobei gleiche Empfängertypen eines Herstellers einen identischen Bias besitzen. In Wanninger (2012) sind a priori Korrekturen für die L1- und L2-Frequenzen für insgesamt neun verschiedene Hersteller (darunter nicht u-blox) zu finden, wobei diese zwischen -0,7 cm und 4,9 cm liegen. Nach Wanninger und Wallstab-Freitag (2007) hat außerdem die eingesetzte Antenne, sowie bei Basislinienprozessierungen die Kombination der Empfänger, einen Effekt auf den IFB. Diese Gründe, sowie die gezeigte Größenordnung des IFB, erklären das erhöhte Rauschen der Doppeldifferenzen für das RL1C-Signal (vgl. 4.18b).

In Abbildung 4.18c ist die Verteilung der Doppeldifferenzen für das EL1C-Signal dargestellt. Hier ähneln sich die Verteilungen der Doppeldifferenzen für die drei Antennen, was sich auch in der prozentualen Angabe derjenigen Doppeldifferenzen widerspiegelt, die unter dem Phasenrauschen liegen. Für die Novatel-Antenne sind dies 99,25 %, für die Tallysman-Antenne 95,29 % und für die Patch-Antenne 99,48 %. Für die Patch-Antenne liegt ein hoher Anteil an Messwerten (knapp 40 %) bei null, was mit den Epochen 609 bis 1300 erklärt werden kann (vgl. Abb. 4.17c).

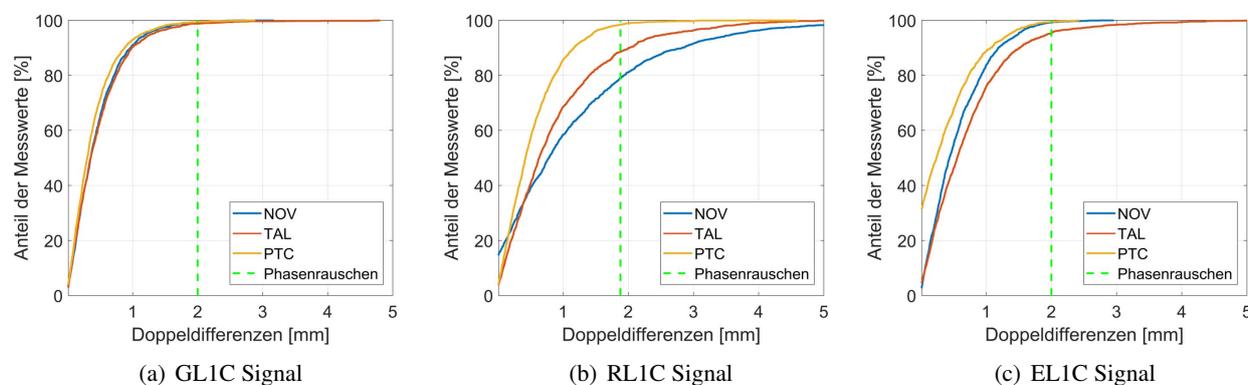


Abbildung 4.18: Kumulative Histogramme für die Basislinie ARDU-LMP6.

Abbildung 4.19 zeigt die Quantile-Quantile-Plots (Q-Q Plots) für die Doppeldifferenzen der Basislinie ARDU-LMP6. Mithilfe diesen grafischen Werkzeugs kann beispielsweise die theoretische Standardnormalverteilung der tatsächlichen Verteilung gegenübergestellt werden, sodass ein visueller Vergleich möglich ist, ob Daten normalverteilt sind, (Nagel, 1996). In Abbildung 4.19 wird die Normalverteilung in rot, die in Quantile eingeteilten Doppeldifferenzen in blau dargestellt. Auf die Weise kann erkannt werden, dass die Daten nicht normalverteilt sind, sofern sie von der roten Linie abweichen. Es lässt sich erkennen, dass die Doppeldifferenzen des GL1C-Signals und ES1C-Signals mit montierter Novatel-Antenne (Abb. 4.19a und 4.19c) innerhalb des Quantils -1 bis 1 normalverteilt sind. Die abweichenden Datenpunkte, insbesondere beim RL1C-Signal mit angebrachter Novatel- beziehungsweise Tallysman-Antenne (4.19b und 4.19e) sowie beim EL1C-Signal der Patch-Antenne (4.19i) deuten auf systematische Abweichungen hin. Der Grund dafür, dass die Daten nicht normalverteilt sind, ist, dass kein stationärer Prozess vorliegt. Nach Kreiß und Neuhaus (2006) bedeutet Stationarität, dass die betrachteten Messwerte zeitunabhängig sind. Dies ist bei den gezeigten Doppeldifferenzen nicht der Fall, da beispielsweise temperaturabhängige Effekte auftreten.

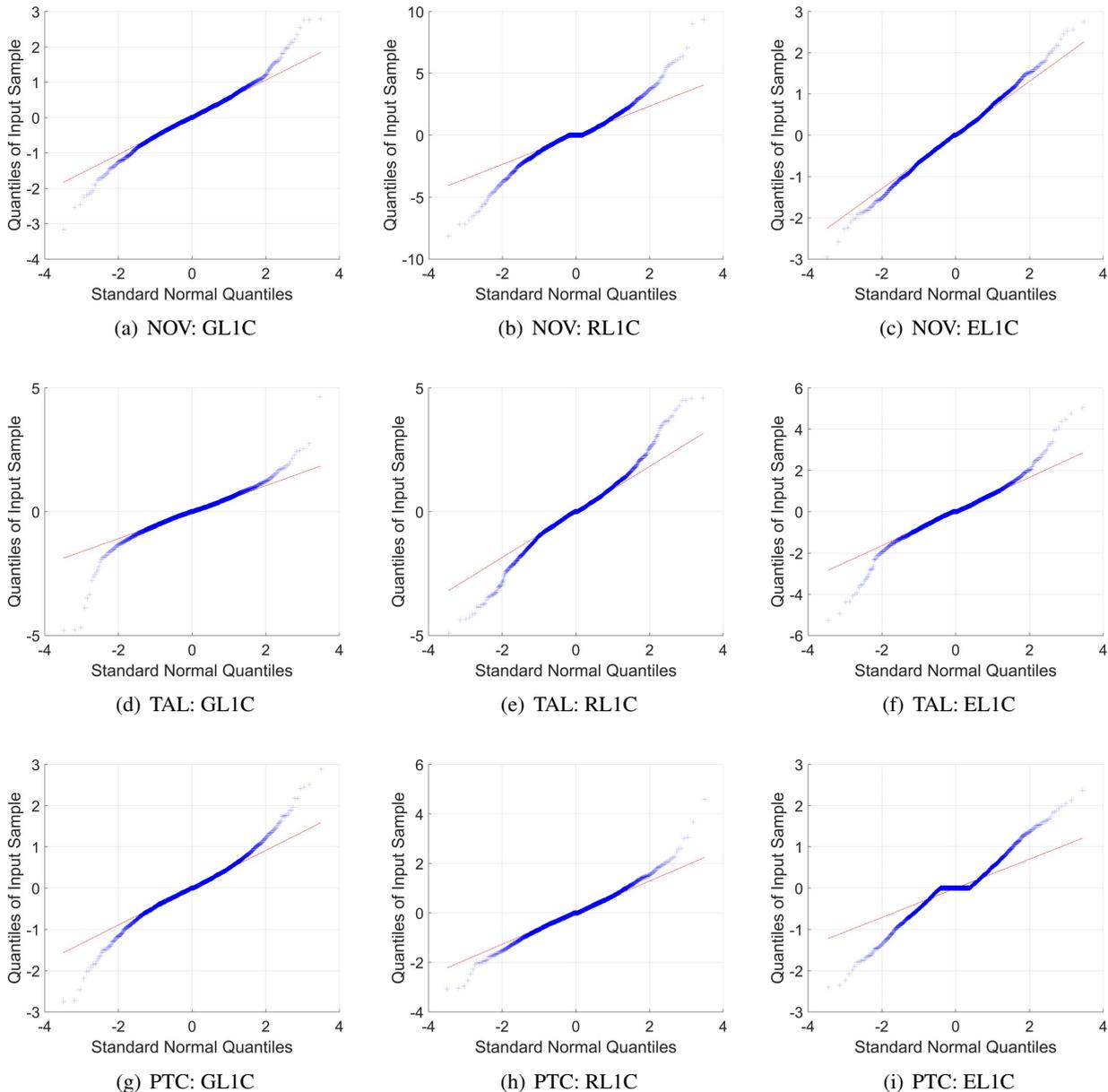


Abbildung 4.19: Quantile-Quantile-Plot (Normalverteilung).

Dass die Daten keiner Normalverteilung entsprechen, lässt sich auch an den Histogrammen der Doppeldifferenzen belegen. Diese sind exemplarisch für die Novatel-Antenne (GL1C-Signal) und Patch-Antenne (EL1C-Signal) für die Basislinie ARDU-LMP6 in Abbildung 4.20 dargestellt. Dabei geben die blauen Balken die Verteilung der Doppeldifferenzen an und die rote Kurve die geschätzte Normalverteilung. Während die Doppeldifferenzen des GL1C-Signals (Novatel-Antenne, Abb.4.20a) als normalverteilt angesehen werden können (vgl. 4.19a) ist dies bei montierter Patch-Antenne für den gegebenen Datensatz für das EL1C-Signal nicht der Fall (Abb. 4.17c sowie Abb. 4.20b). Aus dem in Abbildung 4.20 dargestellten Histogramm wird ersichtlich, dass eine hohe Anzahl an Werten (622) eine Doppeldifferenz von $-0,035$ mm aufweisen und der Datensatz somit deutlich nicht der Normalverteilung entspricht. Verglichen mit Abbildung 4.17c wird deutlich, dass dieses vor allem an den Epochen 609 bis 1300 liegt, bei denen die Differenzen konstant eben diesem Wert entsprechen.

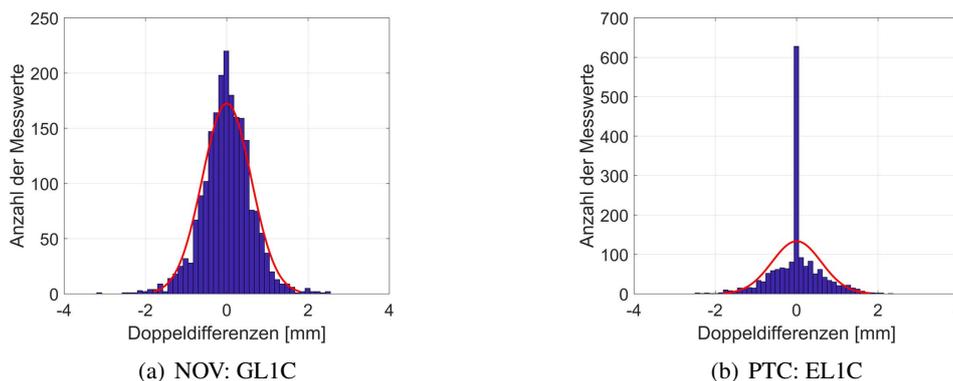


Abbildung 4.20: Verteilung der Doppeldifferenzen (blaue Balken) sowie geschätzte Normalverteilung (rote Kurve).

4.5.2 Kurze Basislinie

Im Zuge der Auswertung der kurzen Basislinie, die eine Länge von etwa 8 m aufweist (vgl. Abb. 4.1), werden die Basislinie LMP6-MSD8 sowie ARDU-MSD8 näher betrachtet, sodass die Leistungsfähigkeit des gesamten Systems (Kombination aus Empfänger und montierter Antenne) untersucht werden kann.

Abbildung 4.21 zeigt die Doppeldifferenzen für die Basislinie LMP6-MSD8(4.21a-c) und ARDU-MSD8 (4.21d-f) mit montierter Novatel-Antenne für die drei Signale GL1C, RL1C sowie EL1C (vgl. Tabelle 4.9). Beachtet werden muss hierbei die unterschiedlichen Skalierungen der y-Achse. Zunächst lässt sich erkennen, dass die Differenzen für die Basislinie LMP6-MSD8 für alle drei Signale größer sind als für die Basislinie ARDU-MSD8. Gerade für das GL1C- und RL1C-Signal ist der Verlauf für die Basislinie ARDU-MSD8 konstanter. Auffällig für die Doppeldifferenzen des EL1C-Signals der Basislinie LMP6-MSD8 (vgl. Abb. 4.21c) sind die regelmäßigen Strukturen. Grund hierfür ist, dass keine feldkalibrierten Werte für den PCO und die PCV für das EL1C-Signal vorhanden sind. Daher wurden für die Referenzstation (MSD8) kammerkalibrierte Werte angesetzt, wohingegen für die Station LMP6 in erster Näherung die beim IGS vorhandenen Werte für den PCO und die PCV für GPS verwendet wurde. Allerdings sind nur Daten für die Novatel-Antenne und nicht für die Tallysman und Patch-Antenne vorhanden. Für alle Doppeldifferenzen der Basislinie LMP6-MSD8, aber vor allem für die Basislinie LMP6-MSD8 mit Novatel-Antenne, lassen sich in dieser Basislinienprozessierung überwiegend der Offset und die Variationen des Phasenzentrums erkennen.

Generell sind die gezeigten Doppeldifferenzen der kurzen Basislinie größer als die der Nullbasislinie. Grund hierfür ist, dass bei der kurzen Basislinie stationsabhängige Effekte, wie beispielsweise Mehrwegeeffekte, einen Einfluss haben. Außerdem fällt bei allen Grafiken auf, dass die Doppeldifferenzen der Basislinien ARDU-MSD8 einen deutlich konstanteren Verlauf aufweisen. Für die Doppeldifferenzen des EL1C-Signals der Basislinie LMP6-MSD8 kann gesagt werden, dass durch nicht adäquate Antennenkalibrierwerte vor allem Effekte des PCO und der PCV erkennbar sind.

Dies bestätigt sich unter anderem bei der Betrachtung der kumulativen Histogramme für die Basislinie ARDU-MSD8, die in Abbildung 4.24 dargestellt sind. So liegen für die Tallysman- und Patch-Antenne für das GL1C-Signal (4.24a) knapp 29 % der Messwerte unter 2 mm sowie für die Novatel-Antenne knapp 23 %. Erkennen lässt sich außerdem, dass alle drei Antennen eine sehr ähnliche Verteilung aufweisen, wenngleich durch die Novatel-Antenne leicht höhere Doppeldifferenzen entstehen. Für das RL1C-Signal (Abb. 4.24b) ist die Verteilung der Messwerte abhängiger von der Antenne, wobei durch die Novatel-Antenne die größten Differenzen auftreten. So liegen hier 87 % der Werte unter 20 mm, wohingegen dies für die Patch-Antenne 94 % und für die Tallysman-Antenne knapp 100 % sind. Grund hierfür ist, wie bereits bei der Analyse der Nullbasislinie genannt, der IFB. Allerdings treten nicht nur im Empfänger Effekte auf, sondern auch die jeweils eingesetzte Antenne verursacht leichte Offsets, die durch den FDMA bei GLONASS entstehen.

Auch für das EL1C-Signal (Abb. 4.24) unterscheiden sich die Doppeldifferenzen zwischen den Antennen stärker. Zwar liegen für die Patch-Antenne 27 % der Werte bei unter 0,1 mm, begründet wird dies aber für den Zeitraum bis etwa zu Epoche 1250, wo diese konstant bei knapp über 0 mm liegen (vgl. Abb. 4.23c). Darüber hinaus sind die Doppeldifferenzen für das EL1C-Signal am größten. Für die Novatel-Antenne liegen 72 % der Differenzen unter 20 %, für die Tallysman-Antenne 93 % und für die Patch-Antenne 99 %. Somit kann gesagt

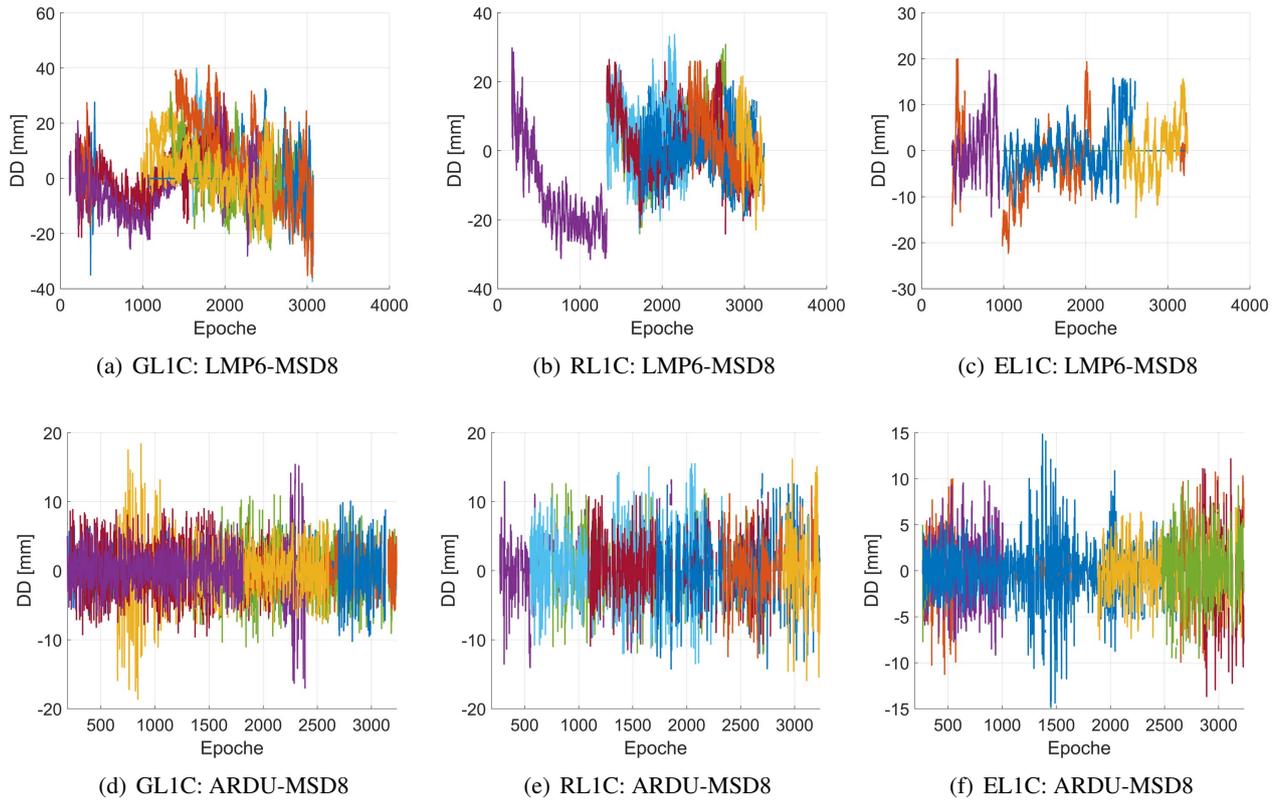


Abbildung 4.21: Auswertung der kurzen Basislinie mit montierter Novatel-Antenne.

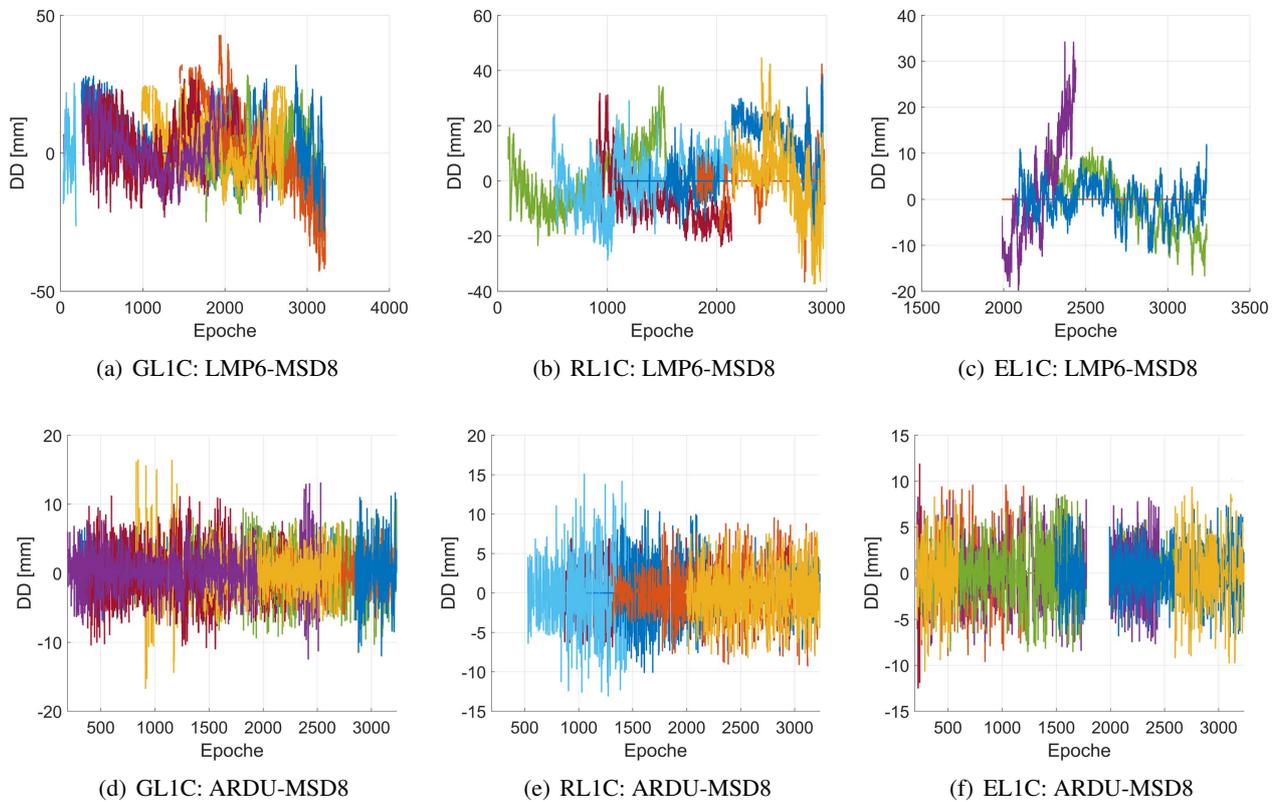


Abbildung 4.22: Auswertung der kurzen Basislinie mit montierter Tallysman-Antenne.

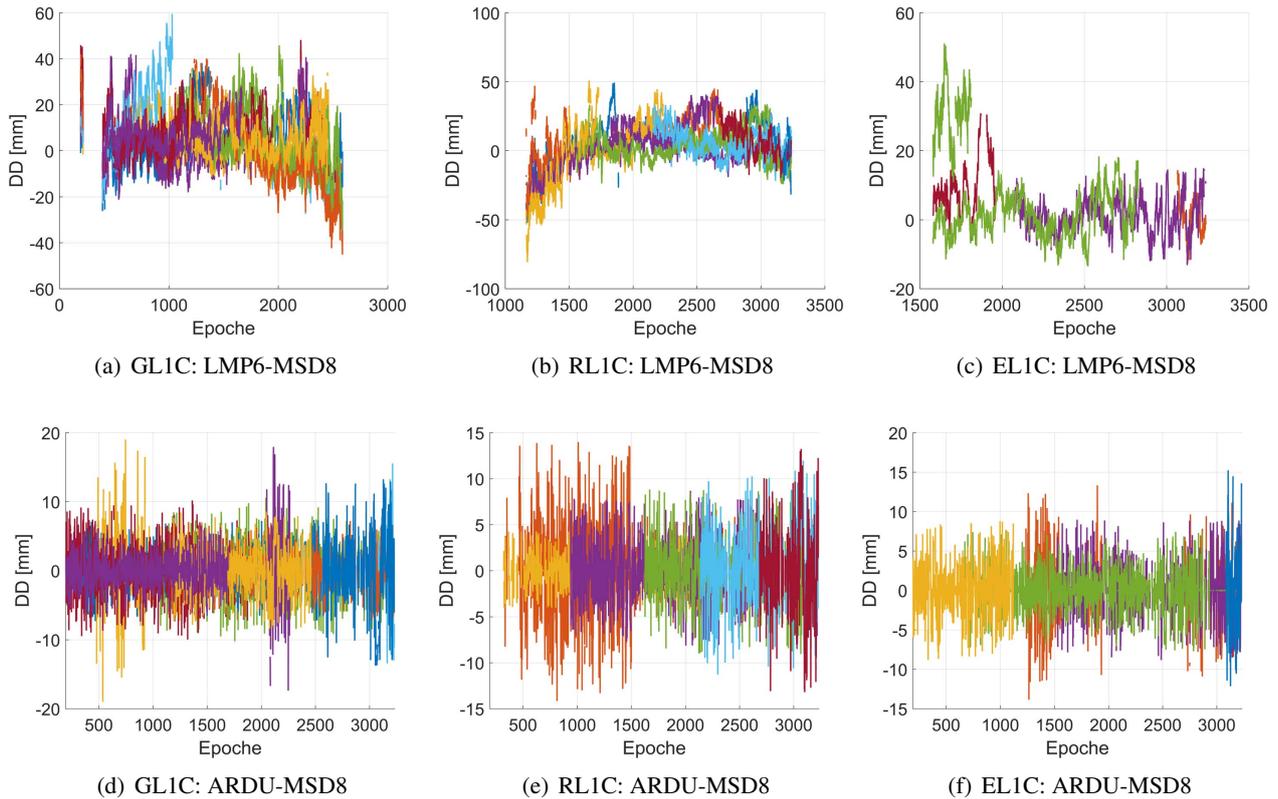


Abbildung 4.23: Auswertung der kurzen Basislinie mit montierter Patch-Antenne.

werden, dass die Aussagen, die aus den kumulativen Histogrammen getroffen werden können, die Erkenntnisse aus den Abbildungen 4.21 bis 4.23 decken.

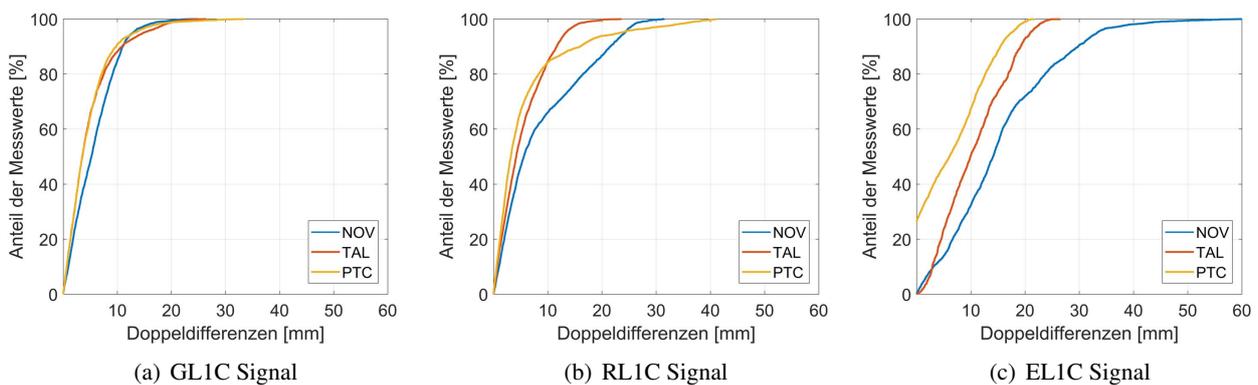


Abbildung 4.24: Kumulative Histogramme für die Basislinie ARDU-LMP6.

In Abbildung 4.25 sind die Q-Q-Plots der Basislinie ARDU-MSD8 dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die Doppeldifferenzen für alle Antennen und Signale nicht der Normalverteilung entsprechen. Doch gerade im mittleren Quantil deckt sich die Verteilung oftmals gut mit der Normalverteilung, beispielsweise für alle Antennen für das GL1C-Signal (Abb. 4.25a, 4.25d und 4.25g). Große Unterschiede zur Normalverteilung innerhalb der äußeren Quantile sind zum Beispiel beim RL1C-Signal mit montierter Patch-Antenne (Abb. 4.25h) zu erkennen. Der Grund dafür, dass die Daten gerade in den äußeren Quantilen oftmals nicht der Normalverteilung folgen ist, dass elevationsabhängige Effekte auftreten. Dies wird beispielsweise auch dadurch erstarkt, dass durch den antennenspezifischen Gain-roll-off Signale mit höheren Elevationen verstärkt werden und somit faktisch eine Gewichtung vorgenommen wird.

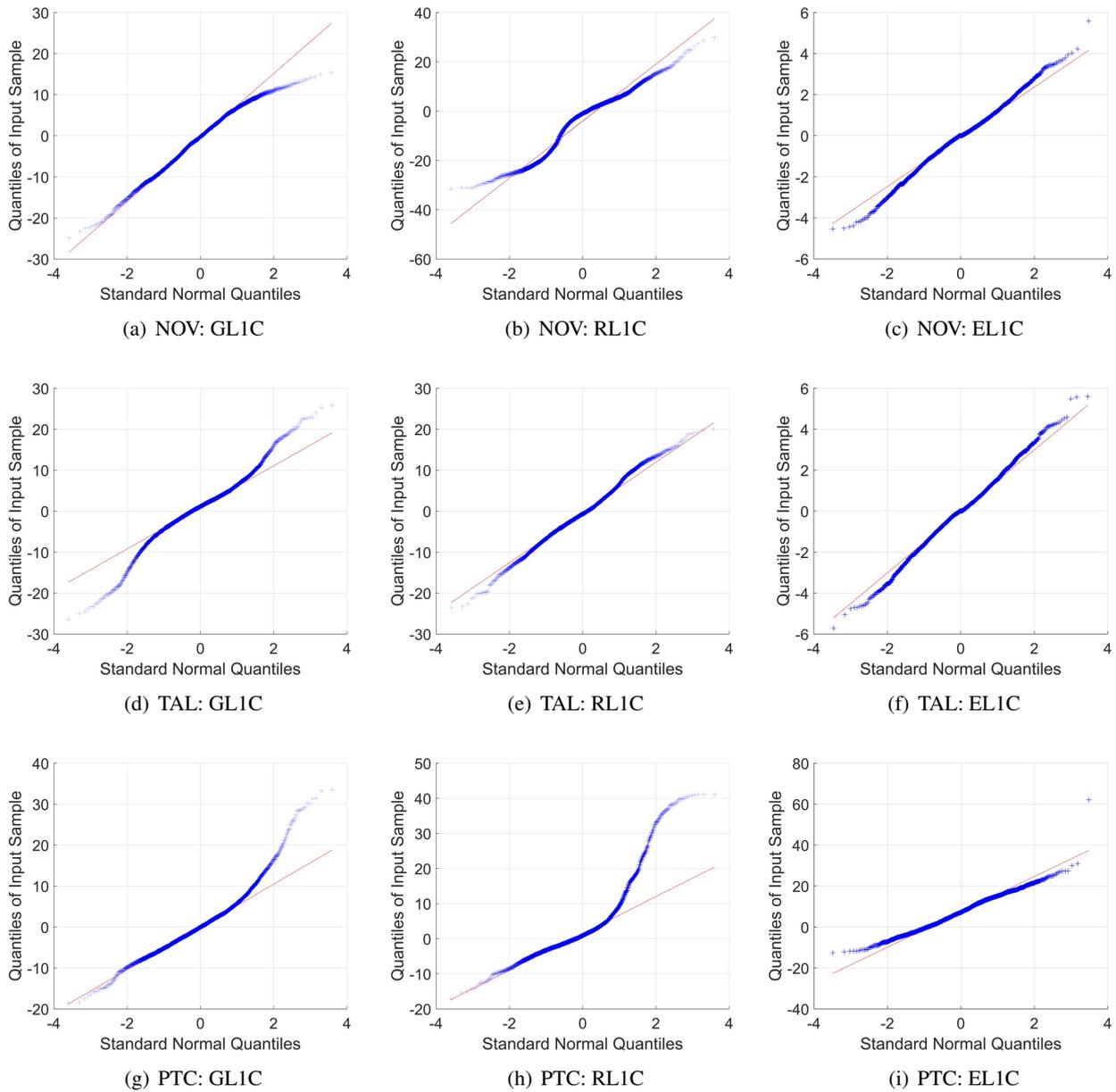


Abbildung 4.25: Quantile-Quantile-Plot (Normalverteilung).

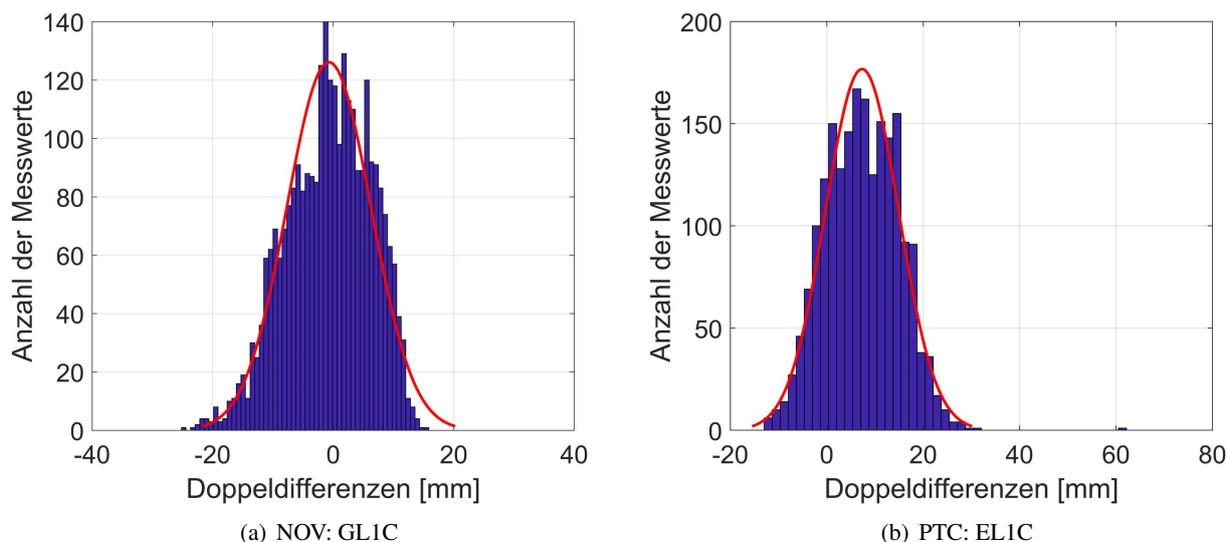


Abbildung 4.26: Verteilung der Doppeldifferenzen (blaue Balken) sowie geschätzte Normalverteilung (rote Kurve) für die Basislinie ARDU-MSD8.

4.6 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Analyse der Neukoordinaten ergeben hat, dass die Stationen ARDU, 0867 und 1779 mit der Novatel-Antenne nahezu identische Ergebnisse bezüglich der Koordinatenwiederholbarkeit aufweisen. Außerdem ist erkennbar, dass die Standardabweichungen für die PTC- und TAL-Antenne um etwa Faktor vier schlechter sind als mit der Novatel-Antenne, was durch das höhere Rauschen bedingt wird. Dies spiegelt sich allerdings nicht eins zu eins in den Doppeldifferenzen wider, da nicht klar getrennt werden kann, durch welche Kombination (geodätischer Empfänger/High-Sensitive-Antenne bzw. Low-Cost Empfänger/High-Sensitive-Antenne) das Rauschen erhöht wird.

Die Auswertung der Satellitensichtbarkeiten sowie der Doppeldifferenzen hat ergeben, dass die Kombination aus High-Sensitive Antenne und Low-Cost Empfänger zu besseren Ergebnissen führt, als die Kombination aus High-Sensitive Antenne und geodätischem Empfänger. Bei der Satellitensichtbarkeit liegt der Grund dabei darin, dass die High-Sensitive Antenne in Kombination mit einem Low-Cost Empfänger auch Satelliten in niedrigen Elevationen trackt. Hohe Abweichungen bei der Analyse der Doppeldifferenzen kamen beim RL1C-Signal durch den IFB zustanden. Außerdem zeigten sich in den Doppeldifferenzen des EL1C-Signals bei der kurzen Basislinie aufgrund von nicht adäquaten Werten für den PCO und die PCV.

Bei der Berechnung der Doppeldifferenzen ergab sich, dass für alle Nullbasislinien der Patch-Antenne sowie alle Signale die wenigsten Cycle-Slips repariert werden musste. Für die Novatel-Antenne traten die meisten Cycle-Slips auf. Bei der kurzen Basislinie sind die Anzahl der auftretenden Cycle-Slips während der Beobachtungsdauer für die Novatel- und Tallysman-Antenne identisch. So traten für die Basislinie ARDU-MSD8 bei den Signalen GL1C und EL1C 80 bzw. 9 Cycle-Slips auf, wohingegen dies bei der Patch-Antenne 19 bzw. 7 waren. In den Doppeldifferenzen lässt sich dieser Effekt nicht sehen, da die Routine der IfE-Toolbox die auftretenden Cycle-Slips repariert.

5. ANALYSE DES SYSTEMS UNTER REALEN BEDINGUNGEN

Dieses Kapitel beschreibt das Testen des entwickelten Systems unter realen Bedingungen mit herausfordernden Satellitensichtbarkeiten.

5.1 Messaufbau

Im Rahmen des Geomonitoring-Projekts SIMULTAN, bei dem geophysikalische sowie geodätische Messmethoden kombiniert werden, um Erdfälle zu überwachen, wurde das entwickelte System mit Novatel-Antenne von DOY 261 bis DOY 264 in Bad Frankenhausen (Thüringen) eingesetzt. Damit die Leistungsfähigkeit des Systems überprüft werden kann, wurde der Lampenkopf, der bereits bei den Messungen unter Laborbedingungen zum Einsatz kam, auf einen Messpfeiler angebracht (Station LMPX). Als lokale Referenzstation dient der Punkt SL03, der in etwa 60 m Luftlinie entfernt liegt (vgl. Abb. 5.1).



Abbildung 5.1: Übersichtskarte der Messumgebung.

Abbildung 5.2a zeigt den Aufbau des entwickelten Systems. Auf dem Lampenkopf (Station LMPX) ist die Novatel-Antenne angebracht. Abbildung 5.2b stellt die Referenzstation dar, die sich auf einer Mauerkrone befindet. Eingesetzt wurde hierfür, analog zu der Referenzstation MSD8 auf dem Messdach, eine Choke-Ring-Antenne (LEICA AR25) sowie ein geodätischer Empfänger (LEICA GRX1200+GNSS).

Die Messung wurde vom 18.09.2017 (DOY 261) bis zum 21.09.2017 (DOY 264) mit einer Aufzeichnungsrate von 10 s angesetzt. Aufgrund von einer Vielzahl an Datenlücken, die durch die Aufzeichnung mit dem Arduino an der Station LMPX entstanden sind, werden im Folgenden die Daten von DOY 261 im Zeitraum von 14:13:08 bis 23:59:50 (GPS-Zeit) analysiert.

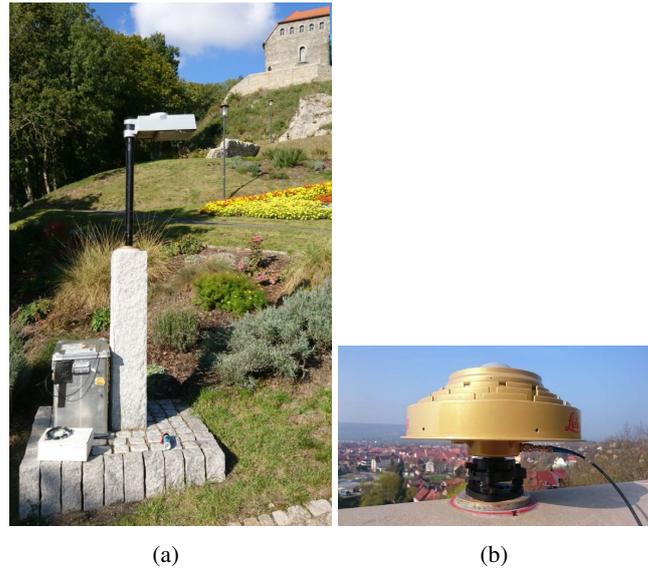


Abbildung 5.2: Darstellung der Station LMPX (a) mit Novatel-Antenne und entwickeltem System sowie Referenzstation SL03 (b) mit geodätischem Empfänger (LEICA GRX1200+GNSS) und Choke-Ring-Antenne (LEICA AR25).

5.2 Analyse der Neukoordinaten

Die Neukoordinaten des Punktes LMPX wurden mittels Leica Geo Office über L1-Doppeldifferenzen berechnet (vgl. Abschnitt 4.2), wobei die Referenzstation SL03 als fehlerfrei angenommen wird. In Tabelle 5.1 sind die berechneten kartesischen Koordinaten inklusive ihrer apriori Standardabweichung aufgeführt. Aufgrund der vielen Datenlücken sowie nicht optimalen Stationsbedingungen liegt die Wiederholbarkeit der X- und Z-Koordinate bei etwa 9 mm, für die Y-Koordinate bei 4,5 mm.

Tabelle 5.1: Berechnete kartesische Koordinaten und deren Standardabweichung für die Station LMPX und SL03.

Station	X [m]	Y [m]	Z [m]	σ_x [m]	σ_y [m]	σ_z [m]
LMPX	3916225,0479	768585,2172	4958818,6711	0,0093	0,0045	0,0091
SL03	3916195,3064	768608,8987	4958871,7549	0,0000	0,0000	0,0000

Abbildung 5.3 zeigt die Standardabweichungen der kartesischen Koordinaten (5.3a) sowie die topozentrischen Koordinaten der Station LMPX (5.3b), wobei das Topozentrum in der Referenzstation SL03 gelagert ist. Somit kann die Länge der Basislinie LMPX-SL03 abgeschätzt werden.

In Tabelle 5.2 sind die Parameter der absoluten Fehlerellipse für die bestimmten Neukoordinaten der Stationen LMPX sowie ARDU mit montierter Novatel-Antenne (aus Messungen unter Laborbedingungen, vgl. Abschnitt 4.2) aufgeführt. Es zeigt sich, dass die große Halbachse A der Station LMPX um Faktor 14,5 und die kleine Halbachse B um etwa Faktor 13 größer ist, als die der Station ARDU. Die Unsicherheiten sind allerdings in alle Richtungen gleich, da das Verhältnis der Halbachsen identisch ist. Auch in der Höhenstandardabweichungen zeigen sich große Unterschiede. Für die Station LMPX liegt diese bei 11,8 mm, für die Station ARDU bei 0,7 mm. Ursache hierfür sind die schlechteren Stationsbedingungen der Station LMPX und somit teilweise ungünstigen Satellitengeometrien.

Tabelle 5.2: Parameter der absoluten Fehlerellipse für die Stationen LMPX und ARDU.

Station	A [m]	B [m]	A/B	φ [°]	σ_h [m]
LMPX	0,0058	0,0040	1,4	-2	0,0118
ARDU	0,0004	0,0003	1,4	-1	0,0007

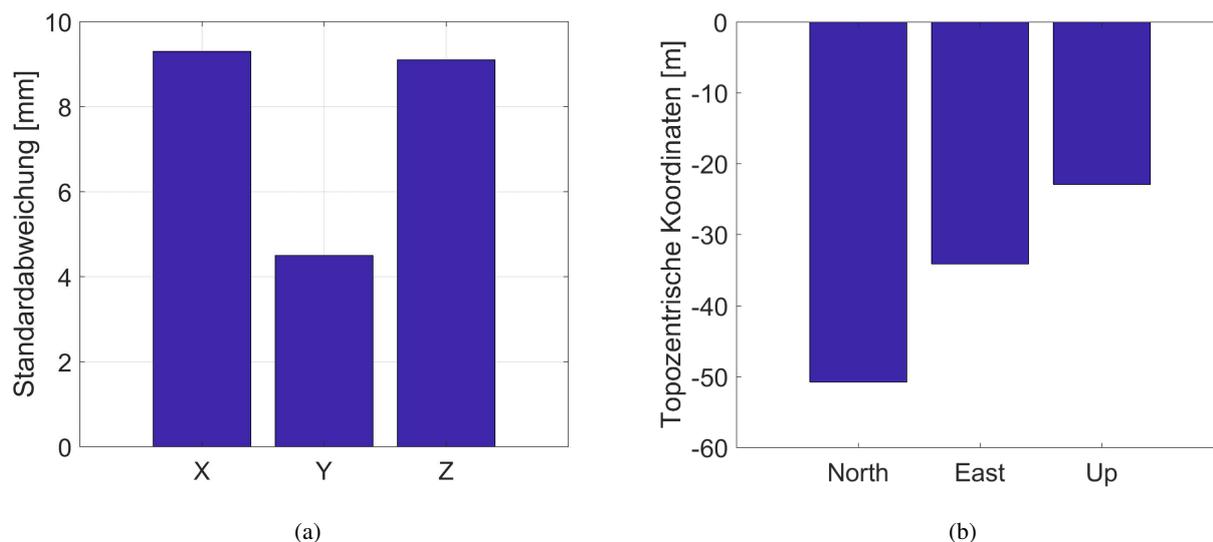


Abbildung 5.3: Standardabweichung der kartesischen Koordinaten (a) sowie topozentrische Koordinaten der Station LMPX (b).

5.3 Analyse der Satellitensichtbarkeit

Abbildung 5.4 stellt die Satellitensichtbarkeit der Station LMPX dar, wobei in Abbildung 5.4a die Verteilung der Epochen mit der Anzahl der sichtbaren Satelliten zeigt. Dies ist die Summe aus den sichtbaren GPS-, GLONASS- und Galileo-Satelliten. Die Epochen, in denen kein Satellit aufgrund der Datenlücken sichtbar ist, werden nicht aufgeführt. Es zeigt sich, dass größtenteils 21 (428 Epochen) oder 22 Satelliten (419 Epochen) sichtbar sind. Die minimale Anzahl an sichtbaren Satelliten ist 14, wobei dies in 21 Epochen der Fall ist.

Abbildung 5.4b zeigt, wie sich die in Abbildung 5.4a gezeigte Summe der sichtbaren Satelliten zusammensetzt. So sind 42 % GPS-, 33 % GLONASS- und 25 % Galileo-Satelliten.

In Abbildung 5.4c ist noch einmal verdeutlicht, wie sich die Anzahl der sichtbaren Satelliten über die Zeit zusammensetzt. Deutlich sichtbar sind hier die Datenlücken, deren Anzahl und Länge mit zunehmender Beobachtungsdauer ansteigen.

Die Ursache hierfür liegt in der Datenaufzeichnung mit dem Arduino auf der SD-Karte. Durch die steigende Dateigröße nimmt das Schreiben der binären GNSS-Daten in die Datei mehr Zeit in Anspruch, sodass der eingehende GNSS-Datenstream der folgenden Epoche nicht verarbeitet werden kann.

Im Vergleich zu den Analysen im Labor sind hinsichtlich der Satellitensichtbarkeit kleine Unterschiede erkennbar. So weist die Station ARDU mit montierter Novatel-Antenne (Messung unter Laborbedingungen) für einen Großteil der Epochen eine Anzahl von 26 bis 28 sichtbaren Satelliten auf (vgl. Abb. 4.8), wohingegen dies bei der Station LMPX 21 oder 22 Satelliten sind. An der Verteilung der Gesamtsumme auf die einzelnen Satellitensysteme hat sich nahezu nichts verändert (maximal $\pm 2\%$), sodass der Grund für die geringere Anzahl der sichtbaren Satelliten an den schlechteren Stationeigenschaften, respektive der größeren Abschattung, liegt.

Um dies zu verdeutlichen, sind in Abbildung 5.5 die Signalstärke-Skypots der Signale GS1C, RS1C und ES1C (vgl. Tabelle 4.8) dargestellt. So ist im Vergleich zu den Bedingungen unter Laborbedingungen (vgl. Abb. 4.12a) das Nordloch deutlich größer, was durch die Abschattungen der Bäume nördlich der Station bedingt wird (vgl. Abb. 5.2a).

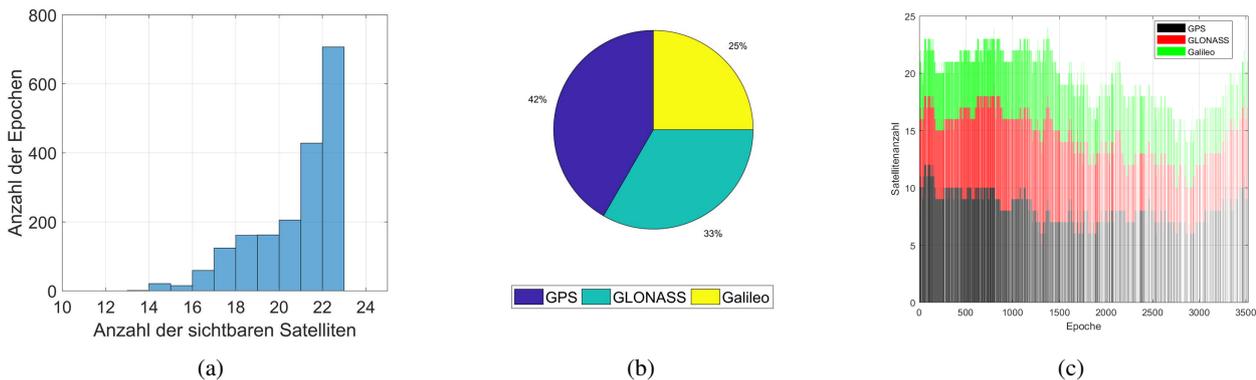


Abbildung 5.4: Satellitensichtbarkeiten der Station LMPX.

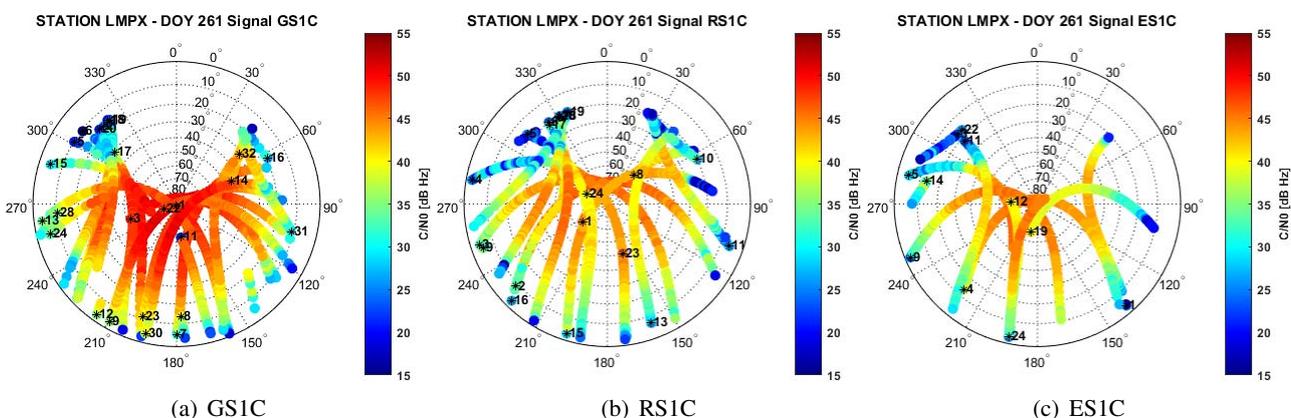


Abbildung 5.5: Signalstärke-Skyplots der Station LMPX.

5.4 Analyse der Signalstärken

Abbildung 5.6a zeigt die durchschnittliche Signalstärke gegenüber der Elevation für die Signale GS1C, RS1C und ES1C. Zum besseren Vergleich ist in Abbildung 5.6b die durchschnittlichen Signalstärken der Station ARDU mit montierter Novatel-Antenne (Messung unter Laborbedingungen) dargestellt.

Die durchschnittlichen Signalstärken der einzelnen Signale bewegen sich im Intervall von etwa 25 dB-Hz in niedrigen Elevationen bis hin zu etwa 50 dB-Hz bei einer Elevation von 90° für die GPS-Signalstärke GS1C. Wie bereits in Abschnitt 4.4 angemerkt, liegt die Ursache für den zackige und sprunghafte Verlauf in der Auflösung der Elevation von 1° und eventuellen Interpolationsfehlern.

Auffällig in Abbildung 5.6a ist der Sprung beim GS1C-Signal, der bei einer Elevation von 63° auftritt. Diese Diskontinuität im Verlauf der durchschnittlichen Signalstärke wird später detaillierter betrachtet (vgl. Abb. 5.7a sowie Abb. 5.8)

Wird die durchschnittliche Signalstärke im Feldversuch mit der des Laborversuches verglichen, so lässt sich erkennen, dass die Signalstärken im Laborversuch nicht höher sind, als unter realen Bedingungen. Allerdings ergeben die Signalstärken einen deutlich glatteren Verlauf, da die auf dem Messdach des IfE empfangenen Signale nicht dermaßen durch Vegetation beeinflusst werden, wie dies bei der Station LMPX der Fall ist.

Abbildung 5.7 zeigt die Signalstärken gegenüber der Elevation. Insgesamt fällt auf, dass in niedrigen Elevation bis etwa 40° viele schwächere Signalstärken liegen. Dies liegt an den Mehrwegeeffekten, die bei der Station LMPX vermehrt auftreten. Wie auch in Abbildung 5.6a zu erkennen, weisen die GPS-Signale die höchste Signalstärke auf und liegen im Mittel um etwa 5 dB-Hz über denen der GLONASS und Galileo-Signale, die in etwa auf einem Niveau liegen. Auffällig ist in Abbildung 5.7 die Ausreißer bei einer Elevation von 63°, bei denen die L1-Signale eines GPS-Satelliten lediglich ein C/N_0 von 20 dB-Hz bis 23 dB-Hz aufweisen. Dieses verursacht auch den Sprung der durchschnittlichen Signalstärke GS1C in Abbildung 5.6a. Bei Betrachtung des

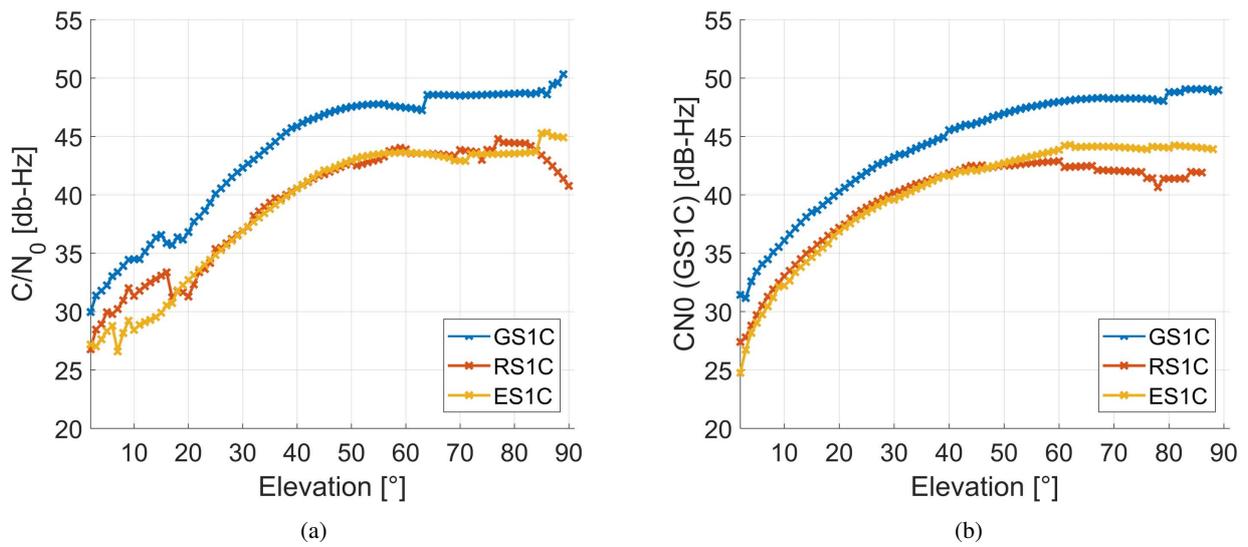


Abbildung 5.6: Durchschnittliche Signalstärken gegenüber der Elevation: (a) Für die Stationen LMPX und (b) für die Station ARDU mit montierter Novatel-Antenne (Messung unter Laborbedingungen).

Signalstärke-Skyplots in Abbildung 5.5a kann erkannt werden, dass dies durch Satellit 11 hervorgerufen wird. Dieser ist ab einer Elevation von etwa 62° sichtbar und weist dort kurzzeitig die sehr geringe Signalstärke auf. Anschließend steigt diese Sprunghaft auf 47 dB-Hz an und der Satellit ist bis zu einer Elevation von 3° und einem Azimuth von etwa 165°, unterbrochen von kurzen Datenlücken, sichtbar. In Abbildung 5.8 ist dieser Verlauf detailliert dargestellt.

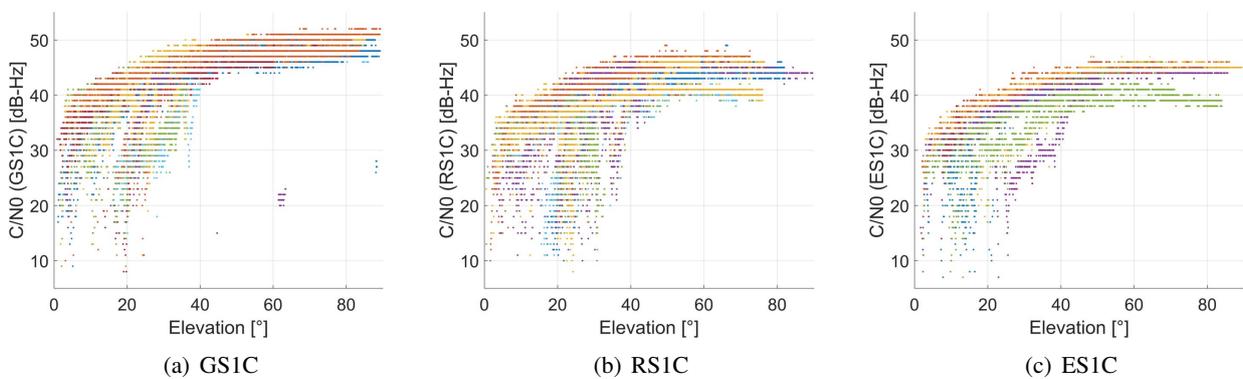


Abbildung 5.7: Signalstärke gegenüber der Elevation für die Station LMPX.

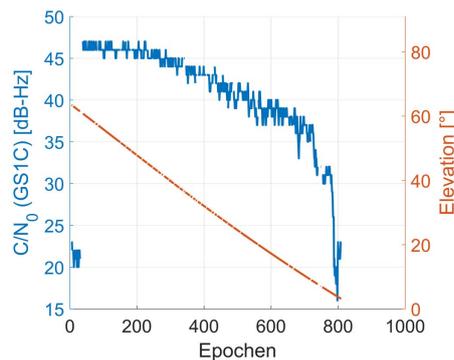


Abbildung 5.8: GS1C-Signalstärke sowie Elevation des G11-Satellitens.

5.5 Auswertung der Positionsbestimmung

Die Koordinaten für die Station LMPX wurden mittels der absoluten Positionsbestimmung (Single-Point-Positioning) zusammen mit dem Empfängeruhrfehler für jede Epoche geschätzt. Die von kartesischen in topozentrische transformierten Koordinaten mit dem Topozentrum in der Station LMPX sind in Abbildung 5.9 dargestellt, wobei auch hier die 10 s Daten von DOY 261 im Zeitraum von 14:13:08 bis 23:59:50 (GPS-Zeit) betrachtet werden.

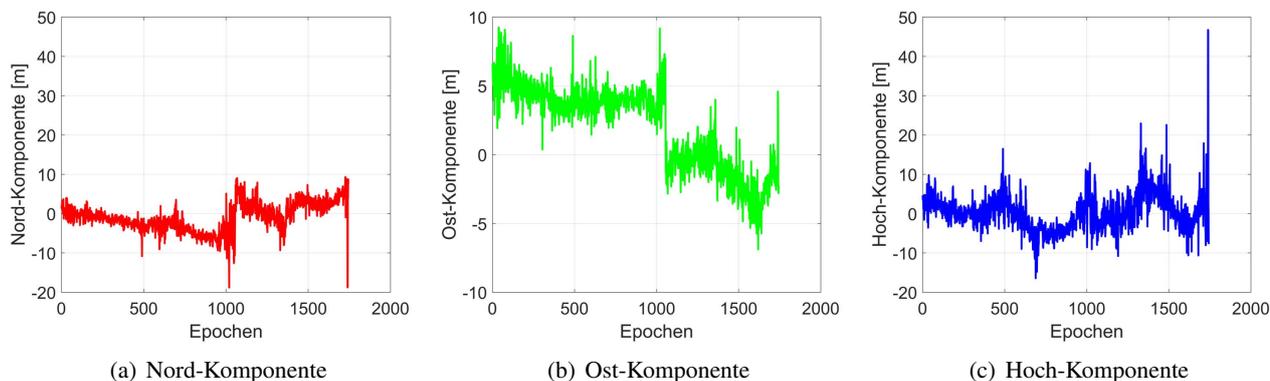


Abbildung 5.9: Topozentrische Koordinaten der Station LMPX.

Für alle drei Koordinatenkomponenten sind Ausreißer erkennbar. Bei der Nordkomponente sind dies Abweichungen von maximal -20 m, für die Ost-Komponente knapp 10 m und für die Hochkomponente von bis zu 47 m. Zu Beginn des zu analysierenden Zeitraums sind enorme Abweichungen vorhanden, die zur verbesserten Anschauung und bei der Berechnung der Standardabweichung allerdings ausgespart wurden. Die Standardabweichung für die Nordkomponente liegt bei 3,6 m, für die Ostkomponente bei 3,6 m und für die Hoch-Komponente bei 4,6 m. Da die epochenweise Lösung nur über die Codemessung berechnet wird, liegt die erwartbare Genauigkeit bei etwa 3 m.

Auffällig sind die zum Teil großen Sprünge in der Koordinatenlösung, besonders stark ausgeprägt in der Ost-Komponente bei Epoche 1055 (Abb. 5.9b), was sich durch eine veränderte Satellitengeometrie erklären lässt. Dies führt zu einer Berechnung einer deutlich anderen Koordinate, was den Sprung in der Positionslösung bedingt.

5.6 Auswertung der atmosphärischen Daten

Neben den Systemkomponenten zur Erfassung und Verarbeitung von GNSS-Signalen, besitzt das entwickelte System Zusatzsensorik, um atmosphärische Daten ermitteln zu können (vgl. Abschnitt 3.1.3). Dies umfasst zwei Sensoren zur Messung der Temperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit sowie des Luftdrucks, um beispielsweise temperaturabhängige Effekte ermitteln oder troposphärische Laufzeitverzögerungen berechnen zu können.

Die Auswertung der atmosphärischen Daten ergab, dass im Gegensatz zu den GNSS-Messungen keine regelmäßigen, kleineren Datenlücken auftreten, deren Anzahl mit zunehmender Beobachtungsdauer zunehmen. Grund hierfür ist, dass das Schreiben dieser Daten auf die SD-Karte deutlich weniger Zeit in Anspruch nimmt, was durch die geringere Datenmenge bedingt wird. Auffällig ist allerdings, dass eine Datenlücke im Zeitraum vom 20.09.2017 7:15:25 bis 21.09.2017 7:05:40 (UTC) ersichtlich ist, sodass letztendlich die Zeitreihen der atmosphärischen Messungen über einen Zeitraum von mehr als 34 Stunden dargestellt sind.

Abbildung 5.10 zeigt den Temperaturverlauf über die Zeitspanne vom 18.09.2017 (14:13:00 UTC) bis zum 19.09.2017 (23:59:50 UTC). Zunächst nimmt die Temperatur aufgrund der späteren Tageszeit ab, bis gegen 9:00 Uhr Ortszeit (7:00 UTC) ein stetiger Anstieg der Temperatur, bedingt durch den Sonnenaufgang, ersichtlich ist. Gegen 11:40 UTC sinkt die Temperatur kurzzeitig um etwa 2°C, bevor sie wieder ansteigt. Grund hierfür könnten Schattenwürfe auf das Gehäuse sein. Ab 16:50 UTC sinkt die Temperatur stetig, bis sie um 23:59:50 UTC einen Wert von 13,8°C aufweist. Der Verlauf der Temperaturkurve ist recht stetig, es sind keine

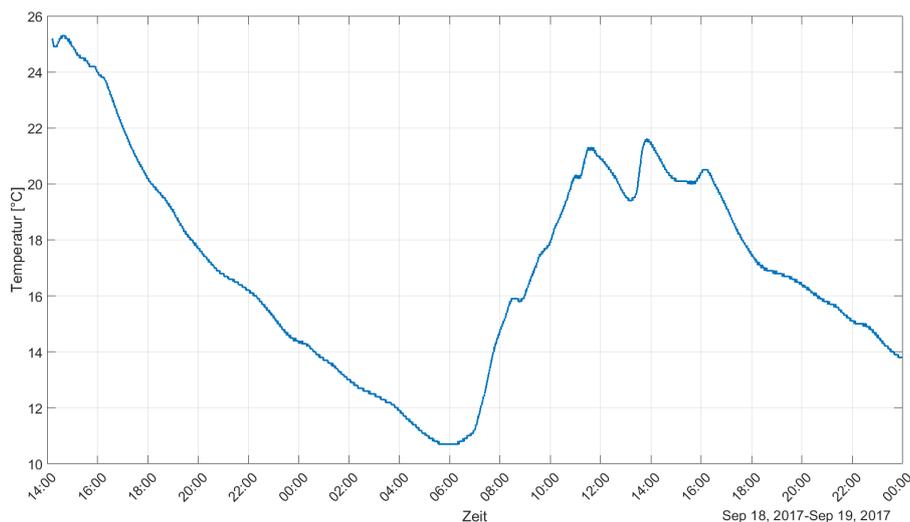


Abbildung 5.10: Ermittelte Temperatur vom 18.09.2017 14:13:00 bis 19.09.2017 23:59:50 (UTC).

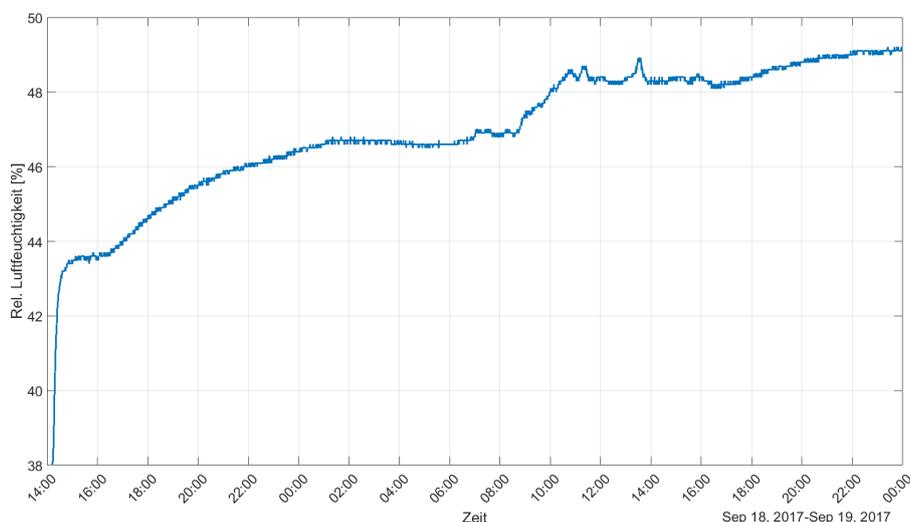


Abbildung 5.11: Ermittelte relative Luftfeuchtigkeit vom 18.09.2017 14:13:00 bis 19.09.2017 23:59:50 (UTC).

groben Ausreißer (Messfehler) erkennbar.

In Abbildung 5.11 sind die erhobenen Daten der relativen Luftfeuchtigkeit für den gegebenen Zeitraum dargestellt. Auffällig ist, dass zunächst die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb einer Stunde um 5,5 % (von 38 % auf 43,5 %) ansteigt. Anschließend ergibt sich ein stetiger und konstanterer Verlauf, wobei sich feststellen lässt, dass keine tagesperiodischen Effekte auftreten. Aufgrund der Tatsache, dass die nicht wasserfesten Sensoren im geschlossenen Gehäuse des entwickelten Systems untergebracht sind, steigt die Luftfeuchtigkeit bis auf einige wenige lokale Minima stetig.

Abbildung 5.12 zeigt den gemessenen Luftdruck in hPa. Wie auch bei der relativen Luftfeuchtigkeit steigt der Luftdruck global stetig an, wobei es einige lokale Minima gibt. Tageszeitliche Perioden lassen sich nicht erkennen. Allerdings liegt der Luftdruck unter dem Wert für die Standardatmosphäre von 1013,25 hPa, der sich auf Normalnull bezieht.

Werden nur die Unterschiede zwischen zwei Temperaturmessungen (vgl. Abb. 5.13) betrachtet, so zeigt sich, dass zwischen den Messungen die Temperatur maximal um $\pm 0.1^\circ\text{C}$ schwankt. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Angaben des Herstellers (vgl. Tabelle 3.2), der die Präzision der Messung mit $0,1^\circ\text{C}$ angibt.

In Abbildung 5.14 sind die relativen Luftdruckunterschiede dargestellt, wobei die roten Linien den Präzisionsbereich des Luftdrucksensors BMP280 angeben. Es zeigt sich, dass von insgesamt 11924 gemessenen Luftdruckwerten zwei Differenzen (rote Kreise in Abb. 5.14) aus diesem Bereich herausfallen, sodass auch die Stabilität dieses Sensors nachgewiesen werden konnte. Angaben zu den Genauigkeiten (Richtigkeit) der beiden Sensoren lassen sich allerdings nicht treffen, da keine adäquaten Sollwerte vorliegen.

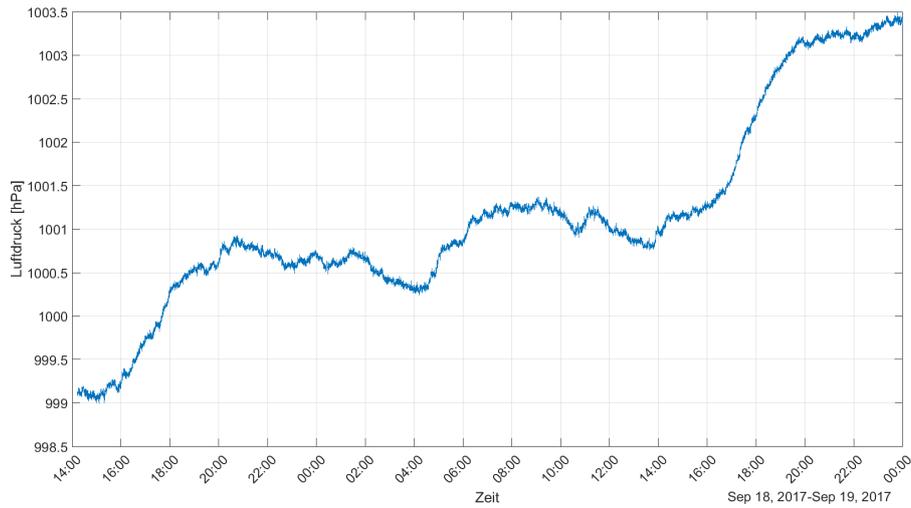


Abbildung 5.12: Ermittelter Luftdruck vom 18.09.2017 14:13:00 bis 19.09.2017 23:59:50 (UTC).

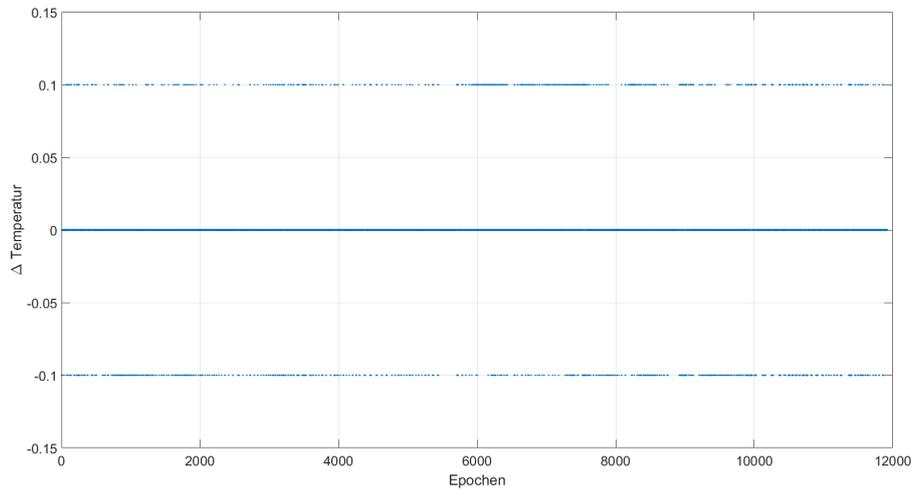


Abbildung 5.13: Relative Temperaturunterschiede zur Überprüfung der Sensorstabilität.

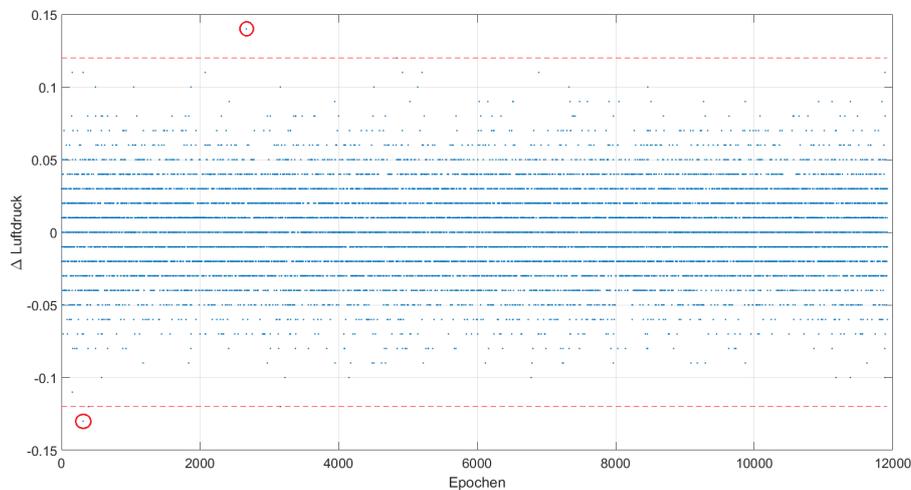


Abbildung 5.14: Relative Luftdruckunterschiede zur Überprüfung der Sensorstabilität. Die roten Linien geben den Präzisionsbereich des BMP280-Sensors an, die roten Kreise markieren Ausreißer.

6. WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE

Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse des entwickelten Systems werden die entstandenen Kosten gegenüber der erreichten Qualität beurteilt. Für eine allumfassende Analyse sollten dabei nicht nur die reinen Anschaffungskosten sondern auch Forschungskosten, laufende Kosten und eventuelle Reparaturkosten betrachtet werden. Die einzelnen Kostenposten während des gesamten Lebenszyklus (Life Cycle Costs) können in drei Phasen (Entstehungs-, Produktlebens- und Nachsorgezyklus) eingeteilt werden und sind beispielsweise in Syska (2007) zu finden.

Die Anschaffungskosten, die im Entstehungszyklus des Systems anfallen, sind in Tabelle 6.1 gelistet, wobei diese nach den in Kapitel 2.3 spezifizierten Arbeitspaketen aufgeschlüsselt sind. Für die Patchantenne (PTC) wurde kein gesonderter Preis aufgeführt, da diese im u-blox EVK-M8T enthalten ist.

Tabelle 6.1: Nettoeinkaufspreise der ausgewählten Systemkomponenten, eingeteilt in Arbeitspakete.

Arbeitspaket	Bezeichnung	Artikelname	Netto-Einkaufspreis [€]
A: Empfangseinheiten	Antenne	Tallysman TW290	120,00
		NOV 501	356,00
		Patchantenne	-
	Receiver	u-blox EVK-M8T	189,00
	Zusatzsensorik	DHT22	3,74
		BMP280	3,54
B: Prozessor	Prozessoreinheit	Funduino	11,66
C: Datenverarbeitung	SD-Kartenslot	Ethernet-Shield	7,02
D: Weitere Komponenten	Gehäuse	Aluminiumgehäuse	28,00
	An/Aus-Schalter	Wippenschalter IP65	2,90
	Schnittstellenelemente	insg. 8 Artikel	56,87
E: Stromversorgung	Solarpanel & Powerbank	SunnyBAG Leaf+	115,83

Zu den Anschaffungskosten kommen die Ausgaben, die während des Einsatzes des Systems entstehen. Dies sind die laufenden Kosten wie beispielsweise die Datenübertragung per GPRS oder Betriebskosten eines Servers. Nach Syska (2007) fallen im Nachsorgezyklus eventuelle Wartungs-, Reparatur und Garantiekosten an. Allerdings sind die laufenden Kosten und auch die Kosten während der Nachsorge schwierig zu kalkulieren. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit nur die Anschaffungskosten mit der erreichten Qualität verglichen. Auch Arbeitsstunden werden nicht mit kalkuliert. Der Gesamtpreis des Systems mit Novatel-Antenne liegt bei 774,47 €. Die Analysen unter Laborbedingungen haben gezeigt, dass eine Genauigkeit im unteren cm-Bereich erreicht werden kann. Eine abschließende Beurteilung der erreichbaren Genauigkeit unter realen Bedingungen mit herausfordernden Satellitensichtbarkeiten ist nicht möglich, da es infolge von Synchronisationsschwierigkeiten zwischen dem Empfänger und dem Prozessor zu Datendiskontinuitäten kommt. Allerdings hat der gewählte Ansatz zum einen gezeigt, dass die Realisierung einer Low Cost Permanent-Station möglich ist und zum anderen, dass ein gutes Verhältnis zwischen den Kosten und den Nutzen besteht und dieses viel Potential birgt.

7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Low Cost Permanent-Station für innerstädtische Überwachungsnetze entwickelt und erprobt. Dazu werden zunächst die benötigten Systemkomponenten spezifiziert und ausgewählt. Dies beinhaltet im Wesentlichen die Zusammenstellung der Empfängereinheit, bestehend aus einem u-blox EVK-M8T Empfänger, einer Einfrequenz High-Sensitive Antenne sowie atmosphärischen Sensoren. Die Datenverarbeitung und Steuerung des gesamten Systems wird über einen baugleichen Arduino-Prozessor vollzogen, wobei die auf einer SD-Karte gespeicherten Rohdaten über einen WebServer abgerufen werden können. Alle Systemkomponenten werden in einem robusten Gehäuse untergebracht, sodass es sich für die permanente Outdoor-Anwendung eignet. Um eine möglichst hohe Flexibilität des Systems zur Anpassung an die jeweilige Umgebung zu gewährleisten, können der Empfänger und der Prozessor über eine USB-Buchse von außen angesteuert werden. Außerdem können durch einen TNC-Anschluss an der Außenseite des Systems unterschiedliche GNSS-Antennen schnell und einfach installiert werden. Des Weiteren können alle Systemkomponenten problemlos ausgebaut werden, sodass von einem modularen System gesprochen werden kann. Durch die Kompaktheit kann das System beispielsweise problemlos auf Laternen angebracht werden, sodass innerstädtische Infrastrukturen für Monitoring-Stationen genutzt werden können.

Eine besondere Herausforderung stellt die permanente und autarke Stromversorgung des Systems dar. Die Konzeption des Systems sieht dafür eine Kombination aus Solarpanel und Powerbank vor, wobei sich hier noch Entwicklungspotential bietet.

Die Erprobung des Systems unter Laborbedingungen mit drei unterschiedlichen High-Sensitive Antennen zeigt, dass sich kleine lokale Netze mit stabilen Basislinienkomponenten kostengünstig und sinnvoll bestimmen lassen können, wenngleich Verbesserungen für das GLONASS-Signal RL1C aufgrund des IFB in Form einer Kalibrierung sinnvoll erscheinen. Außerdem demonstriert diese Arbeit, dass die Kombination aus High-Sensitive Antenne und geodätischem Empfänger zu einem höheren Rauschen in den Doppeldifferenzen führt, als die Kombination aus High-Sensitive Antenne und Low-Cost Empfänger.

Die Erprobung des Systems unter realen Bedingungen mit herausfordernden Satellitensichtbarkeit bestätigt, dass das Multi-GNSS-Konzept zu einer ausreichenden Satellitensichtbarkeit führt. Eine abschließende Beurteilung der erreichbaren Genauigkeit mit dem entwickelten System auch vor dem Fokus der Mehrwegeeffekte ist hingegen nicht möglich, da es aufgrund von Synchronisationsfehlern zwischen dem Empfänger und Prozessor zu Datendiskontinuitäten kommt.

Daher bieten sich hier noch Verbesserungsmöglichkeiten in Form eines Wechsel zu einem Prozessor mit mindestens zwei Kernen an, um Befehle und Operationen parallel ausführen zu können.

In Zukunft könnte das System dahingehend weiterentwickelt werden, dass der Stromverbrauch gedeckt wird, indem es direkt an die Stromquelle einer bestehenden städtischen Infrastruktur angeschlossen wird. Denkbar sind hierbei beispielsweise Laternen oder elektrische Werbetafeln. Außerdem sind in Zukunft eine Fernwartung und Ansteuerung des Systems sowie die Integration von wasserfesten atmosphärischen Sensoren denkbar. Durch die geringen Gesamtkosten ist eine Kombination mehrerer Systeme zu (Überwachungs-)Netzwerken denkbar und sinnvoll.

LITERATURVERZEICHNIS

- Arduino (2017). <https://www.arduino.cc> [Zugriff am 21.08.2017].
- Awange, J. L. (2012). *Environmental monitoring using GNSS: Global navigation satellite systems*. Springer Science & Business Media, Wien New York.
- Bosch (2015). Data sheet bmp280 digital pressure sensor. <http://www.bosch.com> [Zugriff am 13.09.2017].
- Dembowski, K. (2015). *Raspberry Pi-Das technische Handbuch: Konfiguration, Hardware, Applikationserstellung*. Springer-Verlag, Wien New York.
- DIN EN 60529:2014-09 (2014). Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code).
- European Commission, Joint Research Centre (2014). Institute for energy, renewable energy unit photovoltaic geographical information system. <http://re.jrc.ec.europa.eu> [Zugriff am 22.06.2017].
- European Global Navigation Satellite Systems Agency (2017). European GNSS Service Centre. <https://www.gsc-europa.eu/> [Zugriff am 22.10.2017].
- Hamilton, J. (2016). Finding the Right Receiver. *GPS World*, 27(1):S1–S23.
- Hofmann, D.-I. F. U. und Korth, W. (2011). Softwareentwicklung für positionsbestimmung mit satelliten. *Nachhaltige Forschung in Wachstumsbereichen Band II*, Seitenanzahl 34.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., und Wasle, E. (2007). *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media, Wien New York.
- IAC (2017). Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing. <https://www.gsc-europa.eu> [Zugriff am 22.10.2017].
- James, L. F., Young, J. A., und Sanders, K. (2003). A new approach to monitoring rangelands. *Arid Land Research and Management*, 17(4):319–328.
- Kreiß, J.-P. und Neuhaus, G. (2006). *Einführung in die Zeitreihenanalyse*. Springer-Verlag.
- Kurzweil, P. und Dietlmeier, O. K. (2015). *Elektrochemische Speicher*. Springer-Verlag, Wien New York.
- Liu, T. (2013). Digital-output relative humidity & temperature sensor/module dht22. <http://www.aosong.com> [Zugriff am 16.08.2017].
- Mansfeld, W. (1998). *Satellitenortung und Navigation: Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme*. Vieweg Verlagsgesellschaft, Braunschweig Wiesbaden.
- Misra, P. und Enge, P. (2012). *Global Positioning System*. Ganga-Jamuna Press.
- Nagel, M. (1996). *Grafische Datenanalyse*. Lucius & Lucius DE.
- Niemeier, W. (2008). *Ausgleichsrechnung: Statistische Auswertemethoden*. Walter de Gruyter, Berlin New York.
- NovAtel (2016). Selecting the Right GNSS Antenna. *GPS World*, 27(2):S1–S19.
- Raspberry Pi (2017). <https://www.raspberrypi.org> [Zugriff am 23.09.2017].
- Schröder, D., Lütmann, A., und Zimmermann, K. (2017). Das neue dmt safeguard low-cost-gnss-messsystem und seine nutzung im geomonitoring, zur deformations- und bewegungsüberwachung. In: Lienhart, W. (Hrsg.), *Ingenieurvermessung 17, Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz 2017*, Seiten 253–364. Herbert Wichmann Verlag.
- Spellerberg, I. F. (2005). *Monitoring ecological change*. Cambridge University Press.
- Stempfhuber, W. und Alberding, J. (2017). Leistungsfähigkeit von einfrequenz-gnss-empfängern. *Allgemeine Vermessungsnachrichten (avn)*, 124(4):100–19.
- Syska, A. (2007). *Produktionsmanagement: Das A-Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute*. Springer, Wien New York.

- u-blox (2016). Evk-m8t evaluation kit user guide. <http://www.u-blox.com> [Zugriff am 10.09.2017].
- u-blox (2017). u-blox 8 receiver description. <http://www.u-blox.com> [Zugriff am 10.09.2017].
- Wanninger, L. (2012). Carrier-phase inter-frequency biases of glonass receivers. *Journal of Geodesy*, 86(2):139–148.
- Wanninger, L. und Wallstab-Freitag, S. (2007). Combined processing of gps, glonass, and sbas code phase and carrier phase measurements. In: *Proceedings of ION GNSS*, Seiten 866–875.
- Weston, N. D. und Schwieger, V. (2014). *Cost effective GNSS positioning techniques*. International Federation of Surveyors (FIG).
- Xu, G. und Xu, Y. (2016). *GPS: theory, algorithms and applications*. Springer.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ARP	Antennen Referenzpunkt
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CDMA	Code Division Multiple Access
DOY	Day of year
ESA	European Space Agency
EVK	Evaluation Kit
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GLONASS	GLObal NAVigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
IFB	Inter-frequency bias
IfE	Institut für Erdmessung
IP	Internet Protocol
JRC	Joint Research Centre
NMEA	National Marine Electronics Association
PCO	Phase Center Offset
PCV	Phase Center Variation
QZSS	Quasi-Zenit-Satelliten-System
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
SD	Secure Digital
SIM	Subscriber Identity Module
SMA	SubMiniature version A
TNC	Threaded Neill Concelman
USB	Universal Serial Bus
UTC	Coordinated Universal Time
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio

TABELLENVERZEICHNIS

2.1	Übersicht der Arbeitspakete und deren Bestandteile für das Systemdesign	4
3.1	Technische Spezifikationen der vorausgewählten Antennen.	9
3.2	Technische Spezifikationen der Zusatzsensoren.	9
3.3	Typischer Stromverbrauch verschiedener Prozessoren.	10
4.1	Übersicht der Stationen und dem eingesetzten Equipment.	18
4.2	Übersicht der einzelnen Sessions.	18
4.3	Übersicht des Analysezeitraums.	19
4.4	Berechnete kartesische Koordinaten und deren Standardabweichung für die Station ARDU. . .	20
4.5	Berechnete kartesische Koordinaten und deren Standardabweichung für die Station LMP6. . .	20
4.6	Berechnete kartesische Koordinaten und deren Standardabweichung für die Station 1779. . . .	21
4.7	Gesamtanzahl der Satelliten.	23
4.8	Übersicht der verwendeten Signalstärken.	25
4.9	Übersicht der verwendeten Satellitensignale.	28
5.1	Berechnete kartesische Koordinaten und deren Standardabweichung für die Station LMPX und SL03.	40
5.2	Parameter der absoluten Fehlerellipse für die Stationen LMPX und ARDU.	40
6.1	Nettoeinkaufspreise der ausgewählten Systemkomponenten, eingeteilt in Arbeitspakete.	47

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

2.1	Grober Entwurf des Systems, eingeteilt in Arbeitspakete.	4
3.1	Messanordnung für die Ermittlung des Energiebedarfs des Systems mit angeschlossenen Komponenten.	13
3.2	Integration der Stromversorgung in die entwickelte GPS/GNSS-Station inklusive technischer Spezifikationen	14
3.3	Anzahl der Tage in einem Monat, an denen der Ladezustand des Akkus bei 100 % liegt.	14
3.4	Außenansicht des entwickelten Systems.	15
3.5	Schematische Darstellung des Schaltplans, erstellt mit fritzing.org.	16
3.6	Innenansicht des entwickelten Systems.	16
4.1	Darstellung der Messung unter Laborbedingungen, (a) Gitterkreuz auf dem Lampenkopf, mit dem ein eindeutiger Bezugspunkt (roter Kreis) für die Ausrichtung der jeweiligen Antenne hergestellt wird, (b) Ansicht der Laborumgebung und Messkonfiguration auf dem Messdach des IfEs.	18
4.2	Messung unter Laborbedingungen: (a) Novatel-Antenne (NOV) auf dem Lampenkopf, (b) Aufbau der Lampe auf Pfeiler B.	19
4.3	Darstellung des Ablaufs der Messung unter Laborbedingungen auf dem Messdach.	19
4.4	Standardabweichung der mit Leica Geo Office berechneten kartesischen Koordinaten.	20
4.5	Absolute Fehlerellipsen der bestimmten Koordinaten für den Referenzpunkt auf der Laterne.	21
4.6	Topozentrische Koordinaten, gelagert in der Station LMP6 (NOV-Antenne)	21
4.7	Topozentrische Koordinaten mit 2D-Fehlerellipsen, gelagert in der Station LMP6 (NOV-Antenne).	22
4.8	Anzahl der sichtbaren Satelliten für die Stationen ARDU und LMP6.	23
4.9	Anzahl der sichtbaren Satelliten für die Stationen ARDU (a-c) und LMP6 (d-f)	24
4.10	Anzahl der sichtbaren Satelliten mit montierter Novatel-Antenne.	24
4.11	Darstellung der durchschnittlichen Signalstärken für die Stationen ARDU und LMP6.	25
4.12	Signalstärke-Skyplot mit montierter Novatel-Antenne (GS1C-Signal).	26
4.13	Minimale und maximale Signalstärke mit montierter Novatel-Antenne (GS1C).	27
4.14	Darstellung der GPS-Signalstärken gegenüber der Elevation für Session II.	27
4.15	Nullbasislinienauswertung mit montierter Novatel-Antenne.	29
4.16	Nullbasislinienauswertung mit montierter Tallysman-Antenne.	30
4.17	Nullbasislinienauswertung mit montierter Patch-Antenne.	30
4.18	Kumulative Histogramme für die Basislinie ARDU-LMP6.	31
4.19	Quantile-Quantile-Plot (Normalverteilung).	32
4.20	Verteilung der Doppeldifferenzen (blaue Balken) sowie geschätzte Normalverteilung (rote Kurve).	33
4.21	Auswertung der kurzen Basislinie mit montierter Novatel-Antenne.	34
4.22	Auswertung der kurzen Basislinie mit montierter Tallysman-Antenne.	34
4.23	Auswertung der kurzen Basislinie mit montierter Patch-Antenne.	35
4.24	Kumulative Histogramme für die Basislinie ARDU-LMP6.	35
4.25	Quantile-Quantile-Plot (Normalverteilung).	36
4.26	Verteilung der Doppeldifferenzen (blaue Balken) sowie geschätzte Normalverteilung (rote Kurve) für die Basislinie ARDU-MSD8.	37
5.1	Übersichtskarte der Messumgebung.	39

5.2	Darstellung der Station LMPX und der Referenzstation SL03.	40
5.3	Standardabweichung der kartesischen Koordinaten (a) sowie topozentrische Koordinaten der Station LMPX (b).	41
5.4	Satellitensichtbarkeiten der Station LMPX.	42
5.5	Signalstärke-Skyplots der Station LMPX.	42
5.6	Durchschnittliche Signalstärken gegenüber der Elevation: (a) Für die Stationen LMPX und (b) für die Station ARDU mit montierter Novatel-Antenne (Messung unter Laborbedingungen).	43
5.7	Signalstärke gegenüber der Elevation für die Station LMPX.	43
5.8	GS1C-Signalstärke sowie Elevation des G11-Satellitens.	43
5.9	Topozentrische Koordinaten der Station LMPX.	44
5.10	Ermittelte Temperatur vom 18.09.2017 14:13:00 bis 19.09.2017 23:59:50 (UTC).	45
5.11	Ermittelte relative Luftfeuchtigkeit vom 18.09.2017 14:13:00 bis 19.09.2017 23:59:50 (UTC).	45
5.12	Ermittelter Luftdruck vom 18.09.2017 14:13:00 bis 19.09.2017 23:59:50 (UTC).	46
5.13	Relative Temperaturunterschiede zur Überprüfung der Sensorstabilität.	46
5.14	Relative Luftdruckunterschiede zur Überprüfung der Sensorstabilität.	46

ANHANG

A. ABSCHÄTZUNG DER AUTONOMEN STROMVERSORGUNG

Performance of solar home system

Location: 52°23'5" North, 9°42'46" East, Elevation: 55 m a.s.l.,

Nominal power of the PV system: 6 W

Inclination of modules: 37 deg.

Battery size : 5 V, 10 Ah

Discharge cutoff limit (%) 20 %

Consumption per day: 7 Wh

Number of days used for the calculation: 1827

Percentage of days with fully charged battery 78.76%

Average energy not captured due to full battery: 13.15Wh

Percentage of days the battery became fully discharged: 0%

Average energy missing: 0Wh

Month	Ed	Ff	Fe
Jan	6.0	31	0
Feb	7.0	65	0
Mar	7.0	90	0
Apr	7.0	97	0
May	7.0	99	0
Jun	7.0	98	0
Jul	7.0	100	0
Aug	6.0	97	0
Sep	7.0	96	0
Oct	6.0	83	0
Nov	6.0	47	0
Dec	6.0	38	0

Ed: Average energy production per day (Wh/day)

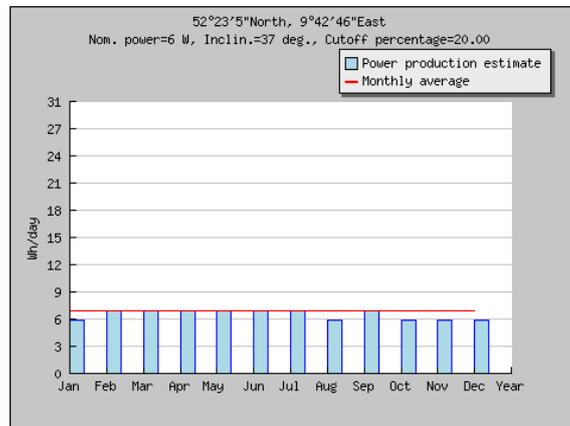
Ff: Percentage of days when battery became full (%)

Fe: Percentage of days when battery became empty (%)

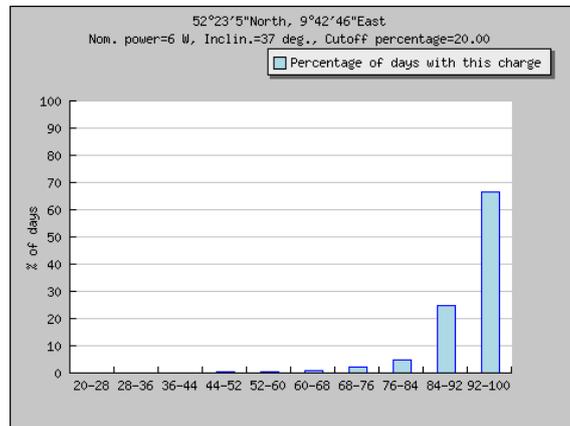
Cs	Cb
20-28	0
28-36	0
36-44	0
44-52	0
52-60	0
60-68	0
68-76	2
76-84	4
84-92	24
92-100	66

Cs: Charge state at end of each hour (%)

Cb: Percentage of days with this charge state (%)



Monthly energy output from SHS system



Probabilities of battery charge state at the end of each hour

PVGIS (c) European Communities, 2001-2012

Reproduction is authorised, provided the source is acknowledged.

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Disclaimer:

The European Commission maintains this website to enhance public access to information about its initiatives and European Union policies in general. However the Commission accepts no responsibility or liability whatsoever with regard to the information on this site.

This information is:

- of a general nature only and is not intended to address the specific circumstances of any particular individual or entity;
- not necessarily comprehensive, complete, accurate or up to date;
- not professional or legal advice (if you need specific advice, you should always consult a suitably qualified professional).

Some data or information on this site may have been created or structured in files or formats that are not error-free and we cannot guarantee that our service will not be interrupted or otherwise affected by such problems. The Commission accepts no responsibility with regard to such problems incurred as a result of using this site or any linked external sites.