

Fakultät für Geoinformation



Bachelorarbeit:

Untersuchungen zum Einfluss der Antennenkalibrierungen auf die Genauigkeit der GNSS-Höhenbestimmung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Mess- und Auswertestrategien

angefertigt von:

Markos Thumianides

Studiengang: Geoinformatik und Satellitenpositionierung
Betreuer: Prof. Dr. Jens Czaja

Die Arbeit wurde angefertigt in Kooperation mit:
Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung

**LANDESAMT FÜR
DIGITALISIERUNG,
BREITBAND UND
VERMESSUNG**



Semester: SoSe 2019
Abgabetermin: 21.06.2019

Informationen zu dieser Bachelorarbeit:

Editor:

Nachname: Thumianides

Vorname: Markos

E-Mail (HM): thumiani@hm.edu

E-Mail (privat): marcos-141414@hotmail.com

Tel. (Handy): +49 171 4167489

Tel. (Festnetz): +49 089 54760320

Thema:

Untersuchungen zum Einfluss der Antennenkalibrierungen auf die Genauigkeit der GNSS-Höhenbestimmung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Mess- und Auswertestrategien.

Daten:

Rinex 2.11, Rinex 3.03.

ANTEX-Files.

Softwares:

WaSoft, Version: 1.4.

Leica Infinity, Version: 3.1.

Vorwort

Während meines Praxissemesters (Sommersemester 2018) am Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) war ich im Referat 83, geodätischer Raumbezug und insbesondere im Sachgebiet 831, SAPOS (Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung) beschäftigt. Erfreulicherweise wurde mir dort die Möglichkeit geboten, eine Bachelorarbeit zum Thema SAPOS zu bearbeiten. Die Module Satellitenpositionierung I und II waren schon während meines Studiums an der Hochschule München zwei der interessantesten Fächer und dadurch war meine Entscheidung für dieses Thema naheliegend. Ich bin sehr froh, dass ich mit dieser Arbeit meine Kenntnisse in diesem Bereich vertiefen konnte.

Darüber hinaus liefert diese wissenschaftliche Untersuchung wichtige Ergebnisse über den Einfluss der Antennenkalibrierungen auf die Genauigkeit der GNSS-Höhenbestimmung, die auch Gegenstand von Untersuchungen des SAPOS Sachgebietes sind.

An dieser Stelle möchte ich allen Personen, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben, meinen speziellen Dank aussprechen.

Besonderer Dank gebührt meinem Betreuer an der Hochschule München für angewandte Wissenschaften, Herrn Prof. Dr. Czaja, der mir jederzeit bei Fragen Hilfestellung leistete und mich mit wichtigen Ideen unterstützte.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Andreas Brünner, dem Sachgebietsleiter von SAPOS, der mir die Bachelorarbeit im LDBV ermöglicht hat.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Martin Freitag, dem stellvertretenden Sachgebietsleiter von SAPOS bedanken, der mich zusammen mit Herrn Andreas Brünner fachlich betreut und mir viele Informationen und Anregungen gegeben hat.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	3
INHALTSVERZEICHNIS	4
1 EINLEITUNG	6
1.1 VORINFORMATIONEN	6
1.2 ZIELSETZUNG	7
1.3 AUFBAU DER ARBEIT	8
2 THEORIE, DATEN, METHODIK, SOFTWARE	9
2.1 GNSS-EMPFANGSANTENNEN	9
2.2 ANTENNENMODELL.....	9
2.3 ANTENNENPARAMETER PCO UND PCV	10
2.4 ANTENNEN-KALIBRIERVERFAHREN	12
2.4.1 <i>Die Entwicklung der Kalibrierverfahren</i>	12
2.4.2 <i>Relative Kalibrierverfahren</i>	13
2.4.3 <i>Absolute Kalibrierverfahren</i>	14
2.5 NAHFELD- UND MULTIPATHEFFEKTE	19
2.5.1 <i>Stationsabhängige Effekte</i>	19
2.5.2 <i>Kalibrierung des Nahfelds</i>	21
2.5.3 <i>Stationskalibrierung</i>	22
2.6 WEITERE FEHLEREINFLÜSSE BEI DER GNSS-POSITIONSBESTIMMUNG.....	23
2.6.1 <i>Messrauschen</i>	23
2.6.2 <i>Troposphärische und ionosphärische Einflüsse</i>	23
2.6.3 <i>Zenitverzögerung (Zenith Total Delay)</i>	25
2.6.4 <i>Satellitenbahnfehler:</i>	25
2.6.5 <i>Uhrenfehler der Satelliten</i>	26
2.6.6 <i>Einflüsse der Satellitengeometrie:</i>	26
3 KONZEPT DER UNTERSUCHUNG	28
3.1 AUSWAHL UND AUFNAHME DER GEEIGNETEN MESSDATEN	28
3.1.1 <i>Aufzeichnung von Messdaten</i>	29
3.2 VERWENDETE ANTENNEN	30
3.2.1 <i>Leica AR.25. R.4</i>	31
3.2.2 <i>Trimble Chokering TRM 59.8000</i>	31
3.3 VERWENDETE SOFTWARE	32
3.3.1 <i>Wanninger Software (WaSoft)</i>	32
3.3.2 <i>Leica Infinity</i>	33
3.4 ANALYSE DER AUSGANGSDATEN	34
3.4.1 <i>Postprocessing und Speicherung der Daten im RINEX-Format</i>	34
3.4.2 <i>Einzelschritte zur Analyse der Daten.</i>	34

3.5	AUFBAU UND ANALYSE DER ANTENNENKALIBRIERUNGEN.....	36
3.5.1	<i>ANTEX-Format der Antennenkorrekturdaten</i>	36
3.5.2	<i>Individuelle Kalibrierungen</i>	37
3.6	AUSWERTUNG DER DATEN/TESTAUSFÜHRUNG.....	40
3.6.1	<i>Nullbasislinientest</i>	40
3.6.2	<i>Kurze Basislinie</i>	44
3.6.3	<i>Lange Basislinie</i>	46
3.7	HÖHENÜBERTRAGUNG / NIVELLEMENT.....	49
4	ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN	50
4.1	LAGE- UND HÖHENBESTIMMUNG DER PFEILER / NIVELLEMENT.....	50
4.2	NULLBASISLINIENTEST.....	53
4.2.1	<i>Vergleich der Höhendifferenzen zwischen unterschiedlichen Frequenzlösungen bei 10° Elevationsgrenze</i>	53
4.2.2	<i>Vergleich von Höhendifferenzen bei Elevationen von 0° bis 20°</i>	57
4.3	KURZER BASISLINIENTEST	67
4.3.1	<i>L1-Lösung Vergleiche</i>	67
4.3.2	<i>L5-Lösung Vergleiche</i>	70
4.4	LANGER BASISLINIENTEST	72
4.4.1	<i>Lage und Höhenunterschiede bei unterschiedlichen Kalibrierungen</i>	72
4.4.2	<i>Lage und Höhenunterschiede bei unterschiedlichen Satellitensystemen</i>	78
5	BEWERTUNG DER ERGEBNISSE	85
5.1	NULLBASISLINIE.....	85
5.2	KURZE BASISLINIE	86
5.3	LANGE BASISLINIE	86
6	FAZIT UND AUSBLICK	88
7	LITERATURVERZEICHNIS	89
8	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	92
9	TABELLENVERZEICHNIS	93
10	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	95
11	ANHANG / INHALTSÜBERSICHT DES USB-STICKS:	97

1 Einleitung

1.1 Vorinformationen

Der Satellitenpositionierungsdienst SAPOS ist ein Gemeinschaftsprojekt der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) und stellt für jedermann den aktuellen amtlichen Raumbezug mit moderner Technik auf der Grundlage von Satellitensystemen wie GPS, GLONASS und seit März 2019 auch Galileo bereit. Dies ist als infrastrukturelle Grundversorgung ein Teil des gesetzlichen Auftrags der deutschen Landesvermessung.

Grundlage von SAPOS in Bayern ist ein Netz von permanenten GNSS-Referenzstationen sowie Stationen in benachbarten Ländern, welche die komplette Abdeckung der Landesfläche mit Korrekturdaten gewährleisten. Dies ermöglicht differenzielle GNSS-Messungen höchster Genauigkeit, ohne dass der Nutzer selbst einen zweiten Empfänger auf einem Referenzpunkt vorhalten muss. SAPOS stellt Korrekturdaten im amtlichen dreidimensionalen Bezugssystem zur Verfügung¹.

Die Grundlage für SAPOS sind die globalen Satellitennavigationssysteme (GNSS) GPS, GLONASS und Galileo. Diese Systeme ermöglichen zivilen Anwendern die Bestimmung der Position mit einem Empfänger auf etwa 5-10m genau. Um Genauigkeiten bis auf wenige mm zu erreichen, muss der Anwender mit zwei gleichzeitig betriebenen geodätischen GNSS-Empfängern messen. SAPOS ersetzt den für ein differentielles GNSS (DGNSS) notwendigen zweiten Empfänger durch ein bundesweit flächendeckendes Netz von permanent betriebenen Referenzstationen. Die Daten der Referenzstationen werden den Nutzern sowohl in Echtzeit (Realtime) als auch zur nachträglichen Auswertung (Postprocessing) zur Verfügung gestellt. Sie liefern Positionsangaben im Bezugssystem der Referenzstationen, der europäischen Realisierung des WGS84, dem ETRS89. Der Übergang zu den amtlichen Systemen der Landesvermessung ist mittels Transformations- und Höhenmodellen möglich. Die exakt eingemessenen Referenzstationen senden ihre Messdaten über Datenleitungen in Echtzeit an die bayerische SAPOS-Zentrale. Hier werden die Daten verarbeitet und in aufbereiteter Form (Korrekturdaten) für den Nutzer zur Verfügung gestellt. Die simultane Auswertung (Vernetzung) der Referenzstationen in der Zentrale steigert die Zuverlässigkeit und die Genauigkeit der Vermessung erheblich.

¹ <https://www.ldbv.bayern.de/produkte/dienste/sapos.html>

1.2 Zielsetzung

Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist es, Untersuchungen mittels verschiedener Softwareprodukte durchzuführen, um den Einfluss der Antennenkalibrierungen auf die Genauigkeit der GNSS-Höhenbestimmung festzustellen. Unterschiedliche Mess- und Auswertestrategien werden dabei berücksichtigt.

Im Geodätischen Grundnetz und dem Referenzstationsnetz des LDBV-Bayern werden GNSS-Beobachtungen mit höchsten Genauigkeitsanforderungen in Lage und Höhe (1-2mm, 1 Sigma) ausgewertet. Änderungen der eingesetzten geodätischen Antennen machen sich dabei in systematischen Höheneffekten bemerkbar, auch unterschiedliche Kalibrierverfahren beeinflussen die Höhenergebnisse.

Es soll Zweck dieser Arbeit sein, diese rein antennenabhängigen Effekte vom übrigen Fehlerhaushalt dieser GNSS-Messungen zu trennen und zu quantifizieren. Des Weiteren erwartet man sich eine Einschätzung, ob diese Effekte auch auf die SAPOS-Endnutzer Auswirkungen haben könnten. Darüber hinaus erhofft man sich praktische Verbesserungsvorschläge.

Die verschiedenen Bereiche der Arbeit werden im Folgenden kurz erläutert.

Der erste Teil der Untersuchungen befasst sich mit dem Nullbasislinientest auf zwei Teststationen (Pfeiler) in unmittelbarer Nähe der Referenzstation München auf dem südlichen Dach des LDBV. Anschließend wird der Nullbasislinientest in verschiedenen Elevationen durchgeführt und die Ergebnisse analysiert.

Der zweite Teil befasst sich mit dem kurzen Basislinientest bzw. der Koordinatenbestimmung zwischen den zwei oben genannten (in unmittelbarer Nähe liegenden) Teststationen, um die hohe Lage- und Höhengenaugigkeit von kurzen Basislinien mittels zuverlässiger Softwares festzustellen.

Der dritte Teil befasst sich mit den langen Basislinientests zwischen den zwei oben genannten Teststationen und der SAPOS-Referenzstation von Pfaffenhofen. Bei diesem Test sind die Abstände sehr ähnlich zu den großen Abständen (bis zu 50 km) zwischen den permanenten Referenzstationen bei SAPOS. Somit werden unter Berücksichtigung der Troposphäre und weiterer Parameter die Koordinaten der Teststationen berechnet und die Lage- und Höhenunterschiede analysiert.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn dieser Arbeit wurden bereits Beweggründe, Vorinformationen und Zielsetzungen erläutert.

In Kapitel 2 werden zunächst die theoretischen Grundlagen für die Untersuchungen dieser Arbeit angeführt und näher beleuchtet. Diese Grundlagen vermitteln das für den weiteren Verlauf dieser Untersuchung erforderliche Hintergrundwissen und sind Voraussetzung für die weiterführenden Analysen.

In Kapitel 3 wird das Konzept der Untersuchung detailliert vorgestellt. Es stellt somit den elementaren Bestandteil dieser Arbeit dar. In diesem Teil wird erklärt, nach welchen Kriterien die analysierten Daten ausgewählt wurden, welche Schritte für die Aufbereitung und Verarbeitung notwendig waren und wie schließlich daraus die Ergebnisse der Untersuchung abzuleiten sind.

Im vierten Kapitel werden die gewonnenen Ergebnisse der Analyse dargestellt. In diesem Abschnitt werden die Resultate in Form von Tabellen demonstriert, mithilfe von Diagrammen visualisiert und auf die Zusammenhänge hin überprüft.

Im Kapitel 5 erfolgt die Bewertung aller erreichten Ergebnisse. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden dort aufgeführt.

Im sechsten und letzten Kapitel wird die vorliegende Arbeit mit einem Fazit abgeschlossen.

2 Theorie, Daten, Methodik, Software.

2.1 GNSS-Empfangsantennen

Im folgenden Kapitel wird das Modell der GNSS-Empfangsantennen beschrieben. Darauf aufbauend werden Antenneneigenschaften dargestellt und Verfahren zur Kalibrierung der GNSS-Empfangsantennen aufgegriffen. Des Weiteren werden alle Fehlereinflüsse dargelegt, welche die Genauigkeit der Positionsbestimmung beeinflussen können.

2.2 Antennenmodell

Die GNSS-Antenne ist der wichtigste Sensor jeder GNSS-Messung. Die physikalischen Gegebenheiten elektromagnetischer Wellen führen zu einer Verschiebung zwischen dem mechanischen und dem elektrischen Phasenzentrum. Der räumliche Einfall und die Frequenz der Satellitensignale verursachen zudem eine Variabilität des Phasenzentrums.

Die Bestimmung des i. d. R. unzugänglichen Bezugspunktes („virtueller Punkt“) der Trägerphasenmessung an der Antenne (PZ = mittleres Phasenzentrum) ist die hauptsächliche Aufgabe der Antennenkalibrierung. Das mittlere Phasenzentrum wird somit als Bezugspunkt eines jeden Koordinatenergebnisses dargestellt.

Der Nullpunkt der jeweiligen Antenne ist der Antennenreferenzpunkt (ARP). Der Antennenreferenzpunkt ist der einzige an der Antenne festgelegte mechanischer Referenzpunkt (Abb. 1²), auf den die Antennenhöhe und alle äußeren Zentrierelemente der Antenne bezogen werden. „Er ist durch Konvention des International GNSS Service (IGS) im Schnittpunkt von vertikaler Symmetrieachse der Antenne mit ihrer Auflagefläche definiert“³. Der Abstand des mittleren Phasenzentrums vom ARP variiert in Abhängigkeit vom Antennentyp.

Die vollständige Beschreibung des Antennenmodells⁴ erfolgt durch den Antennenoffset genannten Vektor P zum mittleren Phasenzentrum PZ (PCO = phase center offset) zuzüglich der richtungsabhängigen Korrekturwerte (PCV = phase center variations). Das

² Görres, (2009), S. 2.

³ DVW, GNSS 2017, S. 72.

⁴ Vgl. Görres, (2010), S. 257

mittlere Phasenzentrum wird als Mittelwert eines ausgleichenden Kugelsegments über ein definiertes Himmelssegment angegeben, die PCVs werden abhängig von Elevations- und Azimutwinkel tabelliert (Abb. 2⁵). Die PCVs sind im Regelfall mindestens eine Größenordnung kleiner als der PCO.

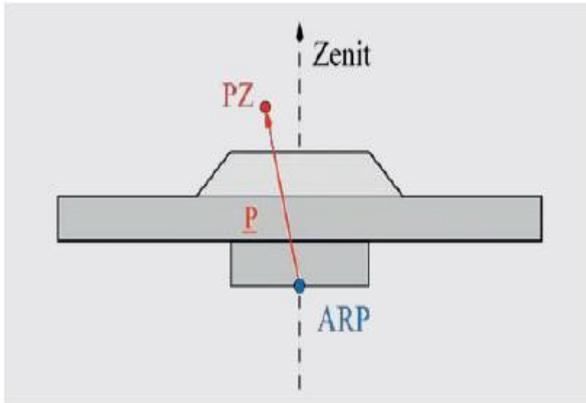


Abb. 1: Geometrische Definition des Antennenphasenzentrums einer GPS-Antenne (PZ = elektrisches Phasenzentrum, ARP = Antennenreferenzpunkt, P = Antennenoffset)

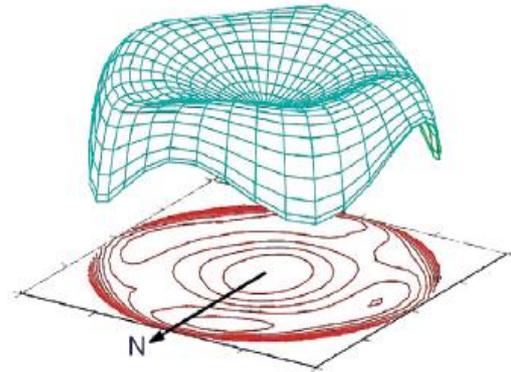


Abb. 2: Elevations- und azimutabhängige PCVs

2.3 Antennenparameter PCO und PCV

Wie schon im obigen Unterkapitel erwähnt, ist das Phasenzentrum PCO (Phase Center Offset) der Vektor, der den räumlichen Bezug zwischen Antennenreferenzpunkt und dem elektrischem Phasenzentrum E_0 beschreibt. In der folgenden Abbildung (Abb. 3⁶) wird dieser Zusammenhang für eine „ideale“ Antenne dargestellt. Dieses Modell gilt theoretisch für alle Antennentypen.

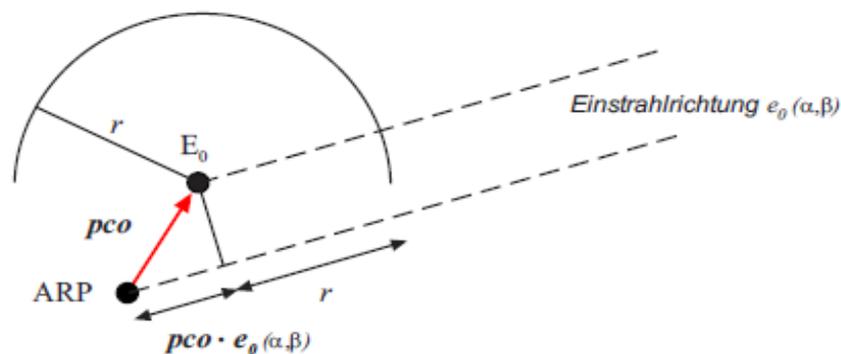


Abb. 3: Antennenmodell für den Fall einer idealen Antenne.

⁵ Görres, (2009), S. 2.

⁶ Zeimetz, (2010), S. 3

Das dargestellte Modell beschreibt e_0 als Einheitsvektor, die Einstrahlrichtung des Satellitensignals in Abhängigkeit von Azimut α und Elevation β . Mittels des Kreises wird die Richtungsunabhängigkeit des Phasenzentrums E_0 gezeigt, wobei der Radius r als die gemessene Phasenlage angesehen werden kann. Eine gemessene Phase kann bei bekanntem PCO durch einen richtungsabhängigen Term unmittelbar auf den ARP bezogen werden⁷:

$$r_{\text{ARP}} = r + \text{pco} \cdot e_0(\alpha, \beta)$$

Ein kugelsymmetrisches elektromagnetisches Feld der Antenne ist eine Voraussetzung für diese Richtungsunabhängigkeit. Die auf dem Antennenelement durch Wechselwirkungen mit dem elektromagnetischen Feld des Senders induzierte Spannung, die als Messsignal über eine Koaxialverbindung an den GNSS-Empfänger geleitet wird, ist im Falle idealer Antennen phasengleich für alle Einstrahlrichtungen.

Im Falle realer Antennen liegt kein kugelsymmetrisches Feld vor. Entsprechend der räumlichen Variationen innerhalb dieses Feldes variiert auch die resultierende Phasenlage des induzierten elektrischen Signals für verschiedene Einstrahlrichtungen. Bezogen auf ein mittleres ortsfestes Phasenzentrum E lässt sich das beschriebene Empfangsverhalten durch richtungsabhängige Phasenzentrumsvariationen (PCV) beschreiben. Die Zusammenhänge von ARP, PCO und PCV sind in der nachfolgenden Abbildung (Abb. 4⁸) dargestellt.

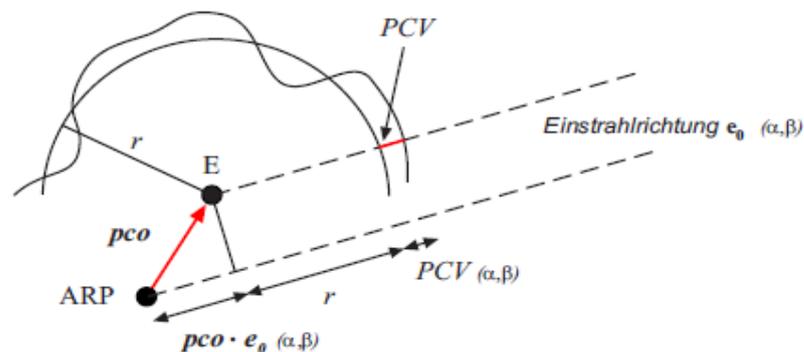


Abb. 4: Modell der richtungsabhängigen Phasenvariationen.

In der Grafik sind die PCVs aus Anschauungsgründen in einem konstanten Abstand r , der als unbeeinflusste Phasenlage angesehen werden kann, vom mittleren Phasenzentrum aufgetragen. Durch folgende Gleichung lässt sich die auf den ARP bezogene Phasenverschiebung r_{ARP} vollständig beschreiben.

⁷ Vgl. Zeimetz, (2010), S. 4

⁸ DVW-Merkblatt, 1/2011, S. 2

$$r_{\text{ARP}} = r + \text{PCO} \cdot e_0(\alpha, \beta) + \text{PCV}(\alpha, \beta)$$

Zur vollständigen Beschreibung eines Antennenmodells sind stets beide Anteile (PCO und PCV) zu berücksichtigen. Die PCVs werden üblicherweise in einem Elevation-Azimuth-Raster (meist 5° Schrittweite) unter Verwendung einer metrischen Einheit angegeben. Die Wahl einer metrischen Einheit dient der Anschaulichkeit, führt aber dazu, dass zur Korrektur der gemessenen GNSS-Phasenmessungen in ein Winkelmaß zurückgerechnet werden muss.

2.4 Antennen-Kalibrierverfahren

2.4.1 Die Entwicklung der Kalibrierverfahren

In den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts wurden die ersten Arbeiten zum Antenneneinfluss auf die hochpräzise Positionsbestimmung veröffentlicht⁹ und erste Versuche mittels Antennenmesskammern, die mit mikrowellenabsorbierenden Materialien ausgekleidet waren, durchgeführt. Das Ergebnis war eindeutig: Die Antenneneinflüsse können bei gleichbleibender Antennenumgebung als konstant angesehen werden. Damit wird eine wesentliche Voraussetzung für die Möglichkeit der Antennenkalibrierung erfüllt.

Neben dem Laborverfahren wurden auch verschiedene Feldverfahren entwickelt. In den 90er Jahren war die Antennenkalibrierung im Feld auf einer Kurzbasis das gebräuchlichste Verfahren¹⁰.

Das Feldverfahren wurde weiterhin dem Laborverfahren vorgezogen, da die Entwicklung der Feldverfahren damals wirtschaftlich günstiger war. Die Laborverfahren waren aufgrund der Nutzung geeigneter Absorberhallen noch relativ kostenintensiv. Außerdem, war auch der Messaufwand sehr hoch, der aus der geringen Automation des Verfahrens resultierte und nur eingeschränkt verfügbar war. Zudem wurde an der Gültigkeit der Kalibrierergebnisse gezweifelt. Mit dem Laborverfahren wurden zwar sehr hohe innere Genauigkeiten erreicht, umfassende Untersuchungen zur Richtigkeit wurden jedoch nicht durchgeführt oder zumindest nicht entsprechend publiziert. In Frage gestellt wurde in erster Linie, ob die Kalibrierergebnisse für reale GPS-Signale gültig sind. Insbesondere die höhere Signalstärke sowie der geringe Abstand zwischen Sende- und Empfangsantenne sind stets als Kritikpunkte an der Laborkalibrierung genannt worden.

Bei den Kalibrierverfahren wird zwischen relativen und absoluten Verfahren unterschieden. Die Antennenparameter (PCO und PCV) werden bei der relativen Kalibrie-

⁹ Vgl. Geiger, A. (1988)

¹⁰ Vgl. Breuer et al. (1995), S. 49-59

ung relativ zu einer Referenzantenne bestimmt. Bei der absoluten Kalibrierung sind die Ergebnisse unabhängig von einer Referenzantenne. Allerdings werden bei allen Verfahren stets nur richtungsabhängige Änderungen des Antenneneinflusses in Relation zu einer Vergleichsrichtung abgeleitet.

Durch die Entwicklung des relativen und des absoluten Feldverfahrens stehen heute insgesamt drei Verfahren mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen zur Verfügung: Die relative Feldkalibrierung, die absolute Feldkalibrierung und die absolute Laborkalibrierung. Den obigen Definitionen folgend, lassen sich die Kalibrierverfahren wie folgt kategorisieren (Abb. 5¹¹).

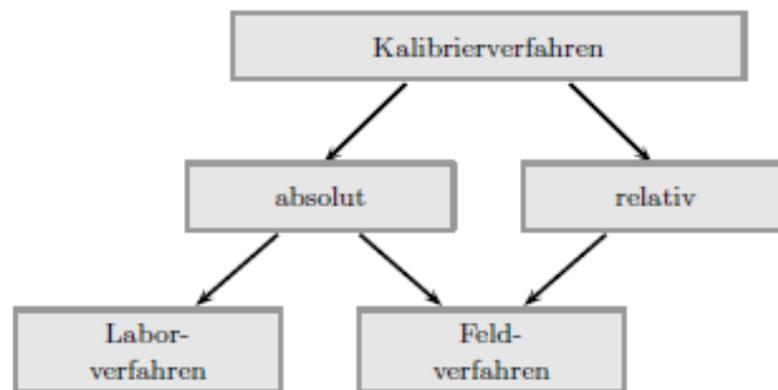


Abb. 5: Kategorisierung der Kalibrierverfahren.

2.4.2 Relative Kalibrierverfahren

Wie schon im oberen Teil erläutert war die Antennenkalibrierung im Feld auf einer Kurzbasis die gebräuchlichste Kalibrierung, da sie mit vergleichsweise geringem Aufwand verbunden ist¹². Die GPS Trägerphasenbeobachtungen werden in Gebrauchslage durchgeführt und die Parameter der zu testenden Antennen relativ zur Referenzantenne geschätzt. Eine bis zum Horizont freie Sicht und ein Umfeld mit geringen Mehrwegeinflüssen müssen für das Verfahren gewährleistet sein.

Wegen des »Nordlochs«, dem Himmelsausschnitt, aus dem keinerlei Signale empfangen werden, wurde es nötig, Antennen auf spezielle drehbare Einrichtungen zu platzieren. Der Grund dafür war, dass nur mittels rotierender Antennen die Auflösung azimutabhängiger Variationen möglich war. Dadurch bestand nachher auch die Möglichkeit die zwei Lageoffsets absolut zu erhalten. Der Höhenunterschied zwischen Refe-

¹¹ Zeimetz, (2010), S. 19

¹² Vgl. Breuer et al. (1995), S. 49-59

renzantenne und Testantenne muss aber für die Ableitung des vertikalen Offsets weiterhin vorgegeben werden.

Durch lange Beobachtungszeiten (möglichst 24 Stunden je Ausrichtung) werden die Mehrwegeeffekte reduziert. Die Mehrwegeeffekte werden von Phasenzentrumsvariationen überlagert, wobei annäherungsweise identische mittlere Mehrwegeeinflüsse an allen Beobachtungstagen angenommen werden. Diese Annahme¹³ setzt allerdings eine gleichbleibende Antennenumgebung voraus.

2.4.3 Absolute Kalibrierverfahren

Die Gemeinsamkeit bei allen Verfahren zur direkten Bestimmung absoluter Antennenparameter ist, dass der Prüfling relativ zur Signalquelle (simulierte Sendeantenne oder Referenzsatellit) gedreht und/oder gekippt wird, um eine komplette und homogene Überdeckung der oberen Hemisphäre der Testantennen zu erreichen. Die absoluten Kalibrierungen haben folgende Unterkategorien: Die absolute Feldkalibrierung und die absolute Laborkalibrierung.

Absolute Feldkalibrierung

Die Methode der absoluten Feldkalibrierung wurde am Institut für Erdmessung der Universität Hannover in Zusammenarbeit mit der Firma Geo++ entwickelt. Entwickelt wurde ein Messroboter zur absoluten Feldkalibrierung. Dieser Industrieroboter wird nach einem optimierten Messprogramm so gesteuert, dass die Hemisphäre der Antenne durch Drehung um das genäherte Phasenzentrum des Prüflings und seine Kippung vor den als quasi-feste Signalquellen genutzten Satelliten in möglichst kurzer Zeit vollständig abgetastet wird und ein homogener Satz von GNSS-Beobachtungen entsteht.

Es besteht außerdem die Möglichkeit einer Trennung der beiden stationsabhängigen Fehlerkomponenten, Antennenparameter (insb. PCV) und Mehrwegeeffekte (Multipath), da die Messanordnung es ermöglicht, Mehrwegeeffekte zu eliminieren oder zu bestimmen. Alle Antennenparameter werden absolut erhalten, ohne dass Informationen über eine Referenzantenne einfließen. Die richtungsabhängigen PCVs werden durch Modellierung von Kugelflächenfunktionen ermittelt.

In der Vergangenheit basierte der Ansatz zur Eliminierung der Mehrwegeeffekte zunächst auf der These der Differenzbildung aus Wiederholungsmessungen. Die GPS-Konstellation war eine täglich-kontinuierliche Wiederholung sowie auch die der Mehrwegeeinflüsse unter ansonsten gleichen Umgebungsbedingungen. Zur Entwicklung der sogenannten Echtzeitkalibrierung führte später das Problem, dass die benötigte Be-

¹³ Vgl. Zeimet (2010), S. 20.

obachtungsdauer von mehreren Tagen sehr lang ist sowie dass sich die Konstellation der Satellitensysteme GLONASS und GALILEO erst nach mehreren Sterntagen wiederholt hat.

Basierend auf der Annahme, dass der Multipath-Effekt zwischen zeitlich dicht folgenden Beobachtungsepochen modellierbar ist, werden durch schnelle Orientierungsänderungen der zu kalibrierenden Antenne durch den Roboter Messungen von mehreren 1000 Orientierungen der Antenne innerhalb weniger Stunden durchgeführt und Mehrwegeeffekte von den gesuchten Antennenparametern getrennt¹⁴.

Ein prinzipieller Nachteil aller Feldverfahren resultiert aus dem im Vergleich zur Kammerkalibrierung starken Messrauschen, welches die Anwendung von Approximationsverfahren notwendig macht¹⁵. Trotz des hohen Messrauschens wird für das absolute Feldverfahren eine innere Genauigkeit von $\sigma = 0.2$ mm bis 0.3 mm angegeben, wobei letzterer Wert für die niedrigen Elevationen (5°) gilt¹⁶. Die hohe innere Genauigkeit zeigt die effiziente Beseitigung der zufälligen Anteile des Messrauschens mit Hilfe der Kugelflächenfunktionen. In folgenden Abbildungen (Abb. 6 bis 8¹⁷) werden Beispiele des Verfahrens der absoluten Feldkalibrierung mit unterschiedlichen Testantennen auf dem Industrieroboter gezeigt.



Abb. 6: Geo++ Roboter mit Leica AR.25.R4 Antenne und Radome.



Abb. 7: Geo++ Roboter mit TPSPN_A5 NONE Antenne.



Abb. 8: Drei Roboter Testantennen bei Geo++ in Garbsen.

¹⁴ Vgl. Böder, V./Menge, F./Seeber, G. (2001), S. 4.

¹⁵ Vgl. Zeimet, P./Kuhlmann H. (2006), S. 267-274.

¹⁶ Vgl. Wübbena et al. (2000). S.3.

¹⁷ Wübbena. G./Wübbena, J./Schmitz, M. (2017), S.6-7.

Absolute Laborkalibrierung

Im Antennenlabor erhält man absolute Kalibrierwerte durch Drehung der Antenne vor einem fest montierten Sender, der die GNSS-Nominalfrequenz sendet. Zur Erfassung der daraus resultierenden Phasenverschiebung wird ein Kalibriersetup benötigt. Dies besteht im Wesentlichen aus einem Netzwerkanalysator (NWA) der ortsfesten Sendeantenne an der einen Seite und der auf einem computergesteuerten Antennendrehstand befestigten Testantenne an der anderen Seite des Aufbaus (Abb. 9¹⁸). Der NWA dient zugleich als Signalgenerator für die GNSS-Trägerwellen (ohne Phasenmodulation) und als Empfangseinheit für die von der zu kalibrierenden Antenne empfangenen Signale. Da das vom NWA abgestrahlte Signal als konstant angesehen werden kann, werden richtungsabhängige Phasenänderungen vom NWA durch den Vergleich von Ausgangs- und Eingangssignal erfasst. Die 5- bzw. 12-Volt-Quelle dient zur Spannungsversorgung der GNSS-Antenne. Diese ist notwendig, da ansonsten der antenneninterne Verstärker nicht arbeiten würde. Der PC dient zur vollständigen Automation der Kalibrierung (Messwerverfassung und Antennendrehung). Als Sendeantenne kommt eine Helixantenne zum Einsatz. Die derzeit verwendete Messkammer ist in folgender Abbildung (Abb. 9) beschrieben.

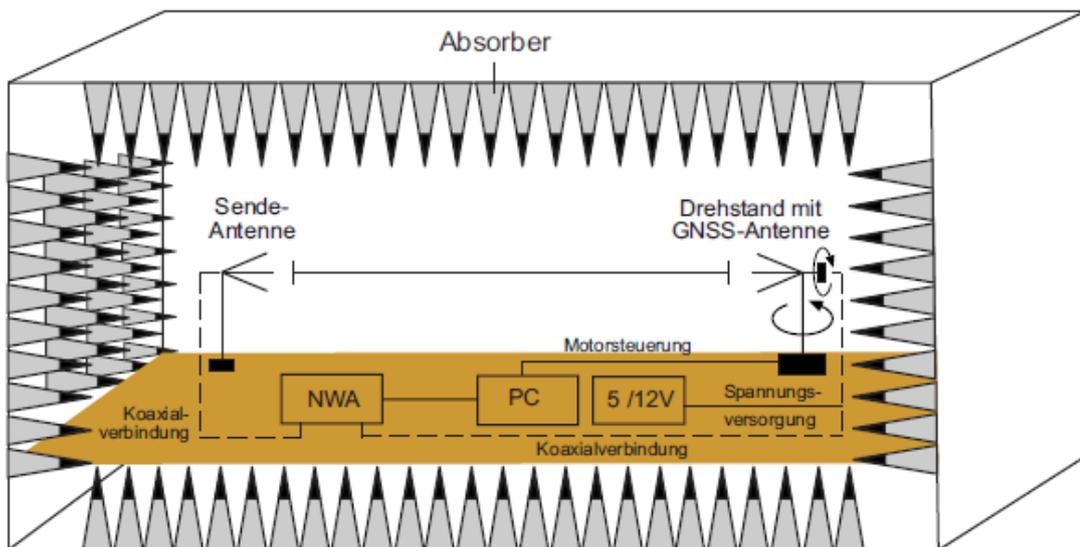


Abb. 9: Prinzipskizze einer Antennenmesskammer.

Zur Vermeidung von Mehrwegeeffekten wird die Kalibrierung idealerweise in einem reflexionsarmen Raum (auch echoloser Raum oder Absorberraum genannt) durchgeführt. Dieser Raum zeichnet sich durch eine an die verwendeten Frequenzen angepasste Absorberrauskleidung aus, welche die Energie der elektromagnetischen Wellen in Wärmeenergie umwandelt. Das vorhandene Mehrwegfeld wird so auf ein Minimum redu-

¹⁸ Zeimetz, P./Kuhlmann H. (2008), S. 4.

ziert und die erreichbare Phasenmessgenauigkeit gesteigert. Die Effektivität der Mehrwegeunterdrückung hängt insbesondere von der Absorbergröße und der Ausrichtung der Absorber zur Signalrichtung ab.

Antennenmesskammer Bonn

Seit Februar 2009 hat die weltweit einzige Messkammer, die speziell für die GNSS-Antennenkalibrierung konzipiert wurde, den Regelbetrieb aufgenommen. Gebaut und bis heute gemeinsam betrieben wurde die Messkammer im Rahmen einer Kooperation der Bezirksregierung Köln (GEObasis.nrw, ehemals Landesvermessungsamt NRW) und des Instituts für Geodäsie und Geoinformation (IGG) der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

Die Bonner Antennenmesskammer ist vollständig mit Dämmmaterialien ausgekleidet, welche die Mikrowellen des GNSS-Spektrums absorbieren. Ein neu konstruierter Drehstand dreht die Testantennen in wählbaren Schrittweiten von Elevations- und Azimutrichtungen vor dem Sender nach einem voll automatisierten Messprogramm. Ein kompletter Durchlauf, der sämtliche GNSS-Frequenzen abdeckt, dauert etwa 40 Minuten.

Untersuchungen¹⁹ in der Konzeptionierungsphase haben ergeben, dass die Entfernung zwischen Sender und Testantenne ohne Qualitätsverlust auf 6m (Meter) reduziert werden kann, d. h., dass eine Länge der Kammer (Abb. 10²⁰) von 8 m ausreichend ist.

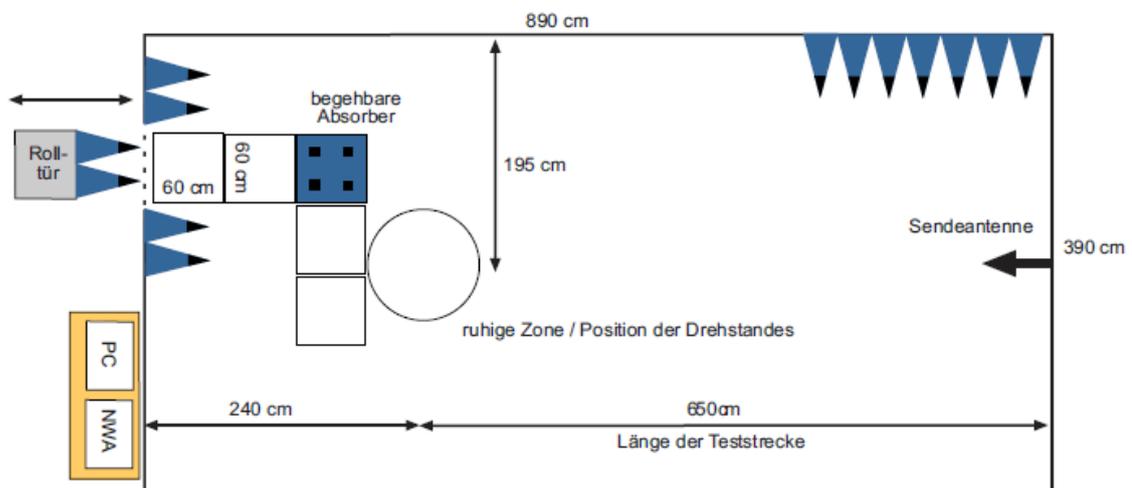


Abb. 10: Konzept der Antennenmesskammer in Bonn.

Die Grundlagen für das Bonner Verfahren zur Laborkalibrierung wurden in einer Absorberkammer am Max-Planck-Institut für Radioastronomie entwickelt, die sich jedoch aufgrund ihrer geringen Größe und der dort verwendeten Absorberauskleidung nur be-

¹⁹ Vgl. Zeimetz et al. (2008), S. 14-15.

²⁰ Zeimetz (2010), S. 28

dingt als geeignet erwiesen hatte²¹. Das hohe Potenzial für Detailuntersuchungen systematischer Effekte resultiert aus dem geringen Rauschniveau der Labormessung und der Tatsache, dass die Phasen im Gegensatz zu allen Feldverfahren direkt abgegriffen werden können. Eine Approximation durch eine Funktion ist nicht erforderlich. Die absoluten Parameter der Testantenne werden direkt erhalten.

In der Absorberhalle des EMV-Testzentrums der Bundeswehr in Greding, der größten in Europa, die durch eine Kooperation zwischen der Universität Bonn, TU Darmstadt und UniBW München genutzt wurde, konnte ein größerer Abstand zwischen Sendee- und Testantenne von 18 m realisiert werden, die erste voll automatisierte Montierung entwickelt und ein eigener Network Analyser in Betrieb genommen werden, der das Sendesignal erzeugt und anschließend die Phase des ausgehenden mit dem von der Testantenne gemessenen eingehenden Signal vergleicht.

Der oft vorgebrachte Einwand, die im Vergleich zu den originären GNSS-Signalen hohe Signalstärke des künstlichen Signals könne die Phaseninformation beeinträchtigen, kann ausgeräumt werden, indem für jede Testantenne diejenige kritische Signalstärke bestimmt wird, unterhalb derer keine Signaländerung mehr eintritt (Abb. 11²²).

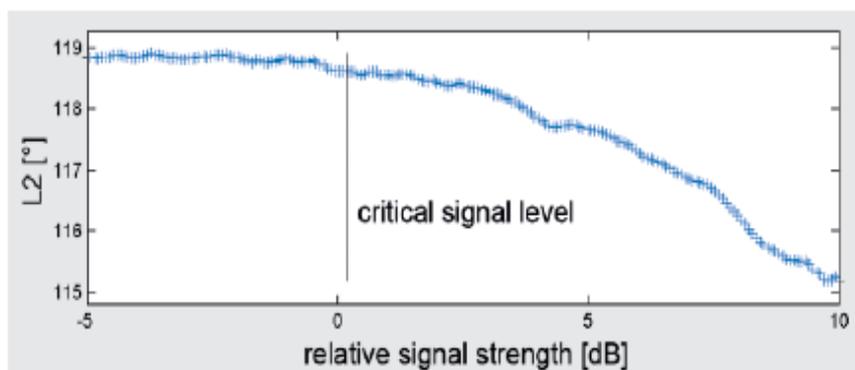


Abb. 11: Einfluss der Signalstärke auf die gemessene Phase:

Trotz allem wurden die absoluten Kalibrierergebnisse aufgrund eines globalen Maßstabproblems im Falle ihrer Verwendung zunächst mit großer Skepsis betrachtet. Sie sind aber seit November 2006 Bestandteil des IGS-Standards.

In der folgenden Tabelle (Abb. 12²³) werden nochmal die gebräuchlichen Verfahren zur Antennenkalibrierung zusammengefasst. Je Kalibrierungsverfahren werden der Lageoffset, der Höhenoffset und der PCV-Wert relativ oder absolut bestimmt und zugewiesen.

²¹ Breuer et al. (1995), S. 49-59

²² Zeimetz et al. (2006). S. 267-274

²³ Görres (2010), S. 257.

	Lage- offset	Höhen- offset	PCV
Feldmessung »in einer Lage«	relativ	relativ	relativ, nur Elevations- abhängigkeit
Feldmessung mit Antennendrehung	absolut	relativ	relativ
Feldmessung mit Messroboter	absolut	absolut	absolut
Labor	absolut	absolut	absolut

Abb. 12: Gebräuchliche Verfahren zur Antennenkalibrierung.

2.5 Nahfeld- und Multipatheffekte

2.5.1 Stationsabhängige Effekte

Nahfeldeffekte gehören zu den größten verbleibenden Einflussgrößen bei der GNSS-Positionsbestimmung. Alle Gegenstände im direkten Umfeld der Antenne (Nahfeld) beeinflussen das Empfangsverhalten der Antenne. Die Stärke des Nahfeldeinflusses hängt unter anderem von Größe, Geometrie, Lage und Material eines Störkörpers ab. Diese Einflüsse führen dazu, dass Kalibrierergebnisse streng genommen nur in der Kalibrierumgebung gültig sind.

Ursprünglich hatte man angenommen, mit einer optimierten Antennenkalibrierung alle Antennenparameter unabhängig von anderen Fehlerquellen erfassen zu können. Inzwischen wurde allerdings erkannt, dass sie nur unzulänglich von den stationsabhängigen Effekten dS, insbesondere von den Mehrwegeeffekten MP (MP= Multipath) des Fern- und Nahfeldes, getrennt werden können.

Im Positionsraum überlagern sich Restfehler der Antennenkalibrierung und Mehrwegeeffekte. Modellfehler, beispielsweise der Troposphärenmodellierung, der größten verbleibenden Fehlerquelle aus dem Bereich der entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse dE, kommen hinzu. In einer typischen Auswertung mit Ansatz der ionosphärenfreien Linearkombination und Schätzung von Troposphärenparametern können sich so im ungünstigen Fall Fehler in der Höhenkomponente bis zu wenigen Zentimetern summieren. Die verbleibenden Effekte können auf die Distanzmessung dD in folgender vereinfachter Formulierung²⁴ angegeben werden:

$$dD = dS + dE \quad \text{mit} \quad dS = PCV + MP_{\text{Nahfeld}} + MP_{\text{Fernfeld}}$$

²⁴ Wübbena, et al. (2006), S. 4

Objekte im Fernfeld der Antenne verursachen kurzperiodische Mehrwegeeffekte. Diese Effekte sind während der Kalibrierung immer andere als an den Beobachtungsstationen. Im Labor werden Mehrwegeeffekte durch aufwändige Dämmung minimiert, um die PCVs isoliert zu bestimmen. Im Verfahren der Roboterkalibrierung werden Mehrwegeeffekte erfasst, um die eigentlichen PCVs getrennt von diesen zu erhalten.

Für den Beobachtungsfall wurden vielfältige Konzepte zur Verringerung von Mehrwegeeffekten entworfen: Maßnahmen zur Abschirmung der Antenne durch Grundplatten, Materialwahl, spezielle Empfangstechnologien zur Verminderung von Mehrwegeeffekten oder ihre Vermeidung durch entsprechende Punktauswahl. Man geht davon aus, dass bei genügend langer Beobachtungsdauer ein Mittelungseffekt eintritt, der ihre Auswirkung in den Positionsraum nahezu eliminiert.

Aufgrund von zusätzlichen Nahfeldeffekten, deren Abschirmung, Erfassung und Trennung von den PCV nicht gelingt, kann die Mehrwegeproblematik ebenfalls nicht einfach gelöst werden. Das direkt an der Antenne befindliche Antennenzubehör verursacht Reflexion und Beugung von Satellitensignalen und führt zu langperiodischen Mehrwegeeffekten, für die auch bei langer Beobachtungsdauer kein Mittelungseffekt eintritt.

In folgender Übersicht (Abb. 13²⁵) werden alle stationsabhängigen Effekte und die verschiedenen Stufen der Kalibrierung gezeigt (von der einfachen Antennenkalibrierung bis zur Nahfeld- und der Stationskalibrierung).

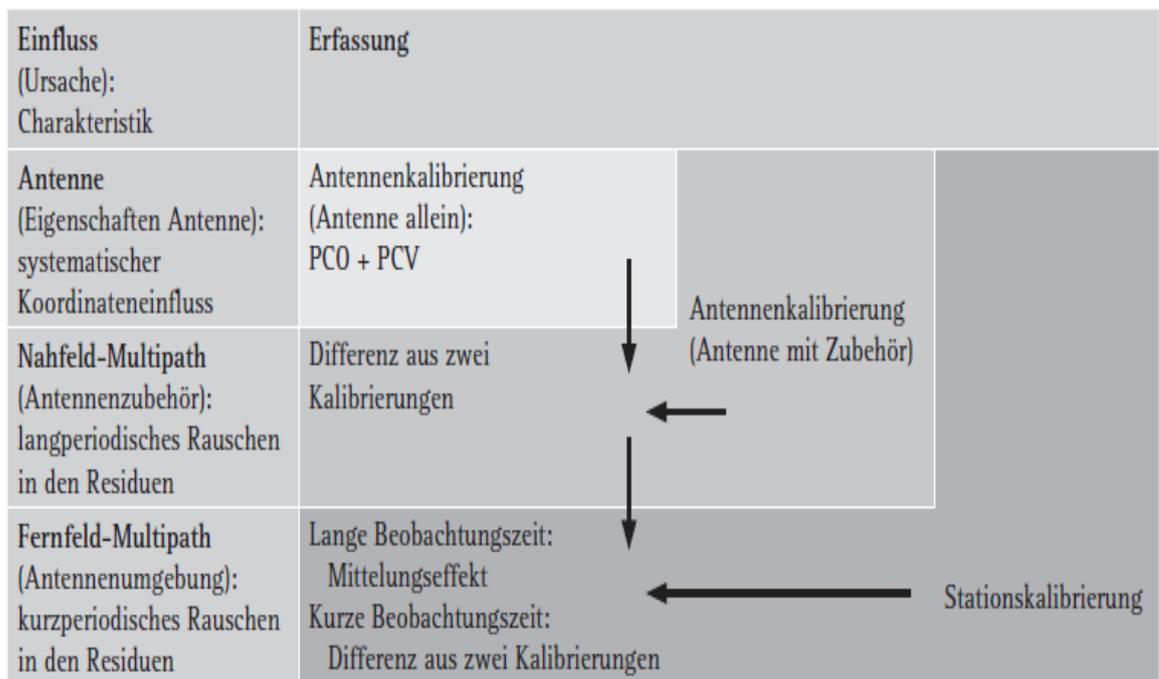


Abb. 13: Stationsabhängige Effekte, ihre Charakteristiken und Erfassungsmöglichkeiten

²⁵ Wübbena, et al. (2006). S.5. Erweitert von: Görres (2010), S. 264.

Zur Reduzierung der bei der GNSS-Messung wirkenden Nahfeldeinflüsse gibt es also derzeit 3 Ansätze²⁶:

- a. Optimierung der Antennenabschirmung (durch die Antennenhersteller).
- b. Kalibrierung der Antenne mit der Nahfeldsituation, die bei der GNSS-Messung verwendet wird.
- c. Weitestgehende Entfernung aller Objekte aus dem Nahfeld der GNSS-Antennen.

2.5.2 Kalibrierung des Nahfelds

Nahfeldeinflüsse können messtechnisch quantifiziert werden, indem Antennen zunächst ohne, dann zusammen mit ihren Unterbauten kalibriert²⁷ werden. Unterschiedliche Stativköpfe und Adaptierungen führten in Untersuchungen zu Änderungen der PCV von ± 4 mm für L1 und L2, nahe dem Horizont auch mehr. Schon sehr kleine Veränderungen des Setups, beispielsweise an der Kabelführung zwischen zwei Wiederholungsmessungen, führen zu Unterschieden²⁸ in den PCV bis 1 mm für die L1-Frequenz und 1.2 mm für L2-Frequenz in allen Elevationsbereichen. Dies ist etwa um einen Faktor 3 größer als bei Wiederholungsmessungen ohne Veränderung. Für hohe Elevationen sind die Differenzen wegen der besseren Abschirmung der Antenne kleiner.

Im internationalen Standard wird dem Nahfeldeinfluss bisher nur dadurch Rechnung getragen, dass für den Fall der Verwendung von Grundplatten oder Radomen als Antennenzubehör gesonderte Kalibrierdatensätze angegeben werden.

Manche Antennen wurden sogar zusammen mit dem Unterbau (für die GNSS-Kampagne DHHN 2008 im deutschen Geodätischen Grundnetz) bestehend aus Dreifuß und Stativkopf, auf dem Roboter der Firma Geo++ kalibriert. So wurde der Einfluss der veränderten Nahfeldeinflüsse zwischen Kalibrierung und Messung minimiert. Bei einem solchen Ansatz der Kalibrierung von Antennen zusammen mit ihrem Nahfeld ist allein die Belastbarkeit des Roboters mit zusätzlichem Gewicht begrenzend.

Kaum umfassend quantifizierbar dürften jedoch witterungsbedingte Effekte sein, z. B. der Belag von Schnee oder Eis auf der Antenne. Einzelne Versuche, bei denen die Testantenne während der Kalibrierprozedur kontrolliert beregnet wurde, ergaben Veränderungen in den PCV bis zu 1 cm²⁹.

²⁶ DVW-Merkblatt 1-2011, S. 8

²⁷ Vgl. Dilssner et al. (2006), S. 13-28

²⁸ Vgl. Zeimetz et al. (2006), S. 267-274

²⁹ Vgl. Schmitz, M./Wübbena, G./Propp, M. (2008), S. 24

Nahfeldkalibrierungen stoßen also immer dann an ihre Grenzen, wenn die Beschaffenheit des Nahfeldes wegen zeitlicher oder räumlicher Veränderungen nicht einwandfrei zu definieren ist. Ebenso stößt man an Grenzen, wenn entschieden wird, Bauteile noch dem Nahfeld zuzuordnen, um sie zusammen mit der Antenne zu kalibrieren, oder wenn sie beispielsweise wegen Überschreitung der mechanischen Belastbarkeit der Kalibrier-einrichtung dem Fernfeld zuzurechnen sind, um sie dann in einer Stationskalibrierung zu erfassen.

2.5.3 Stationskalibrierung

Unter dem Begriff der Stationskalibrierung sind Lösungsansätze entwickelt worden, deren Ziel es ist, alle stationsabhängigen Einflüsse dS zu erfassen und durch Kombination mit Antennen- und Nahfeldkalibrierung einzelne Effekte zu isolieren (s. Abb. 13, auf S. 22). Es liegt also kein Antennenproblem im strengen Sinne mehr vor, da die Kalibrierung der Antenne selbst im Zusammenhang mit der Stationskalibrierung als gelöst betrachtet wird. Die Praxis zeigt jedoch, dass die Antennenkalibrierung nur dann zu einer Genauigkeitssteigerung führt, wenn auch die Mehrwegeeffekte geeignet erfasst werden.

Die Messanordnung des Ansatzes der absoluten Stationskalibrierung sieht vor, dass auf der zu untersuchenden Station neben der Testantenne T, für die Zeit der Kalibrierung eine Referenzantenne R betrieben wird, deren Beobachtungen durch geeignete Maßnahmen als frei von Mehrwegeeffekten angenommen werden³⁰. Nach der oben eingeführten Formulierung erhält man für die beiden Antennen:

$$dD_T = PCV_T + MP_{Nahfeld,T} + MP_{Fernfeld,T} + dE_T$$

$$dD_R = PCV_R + dE_R$$

Entfernungsabhängige Fehler dE werden durch die Bildung von Einfachdifferenzen ΔdD eliminiert. Der Empfängeruhrenfehler wird durch den Anschluss beider Empfänger an ein externes Frequenznormal weitgehend eliminiert.

$$\Delta dD = \Delta dS = (PCV_T + MP_{Nahfeld,T} + MP_{Fernfeld,T}) - PCV_R$$

Wurden beide Antennen vorab kalibriert, sind also absolute PCV bekannt, können die Mehrwegeeffekte als verbleibende Komponente der stationsabhängigen Einflüsse auf die Streckenmessung isoliert werden:

$$\Delta dS = MP_{Nahfeld,T} + MP_{Fernfeld,T}$$

³⁰ Böder et al. (2001), S. 6.

Wurde für die Testantenne eine Nahfeldkalibrierung (Antenne mit Zubehör und Unterbau) durchgeführt, verbleiben nur noch die Mehrwegeeinflüsse des Fernfeldes:

$$\Delta dS = MP_{\text{Fernfeld},T}$$

Im Hannoverschen Verfahren zur Absoluten Stationskalibrierung, das am Institut für Erdmessung in Zusammenarbeit mit der Firma Geo++ u. a. zur Kalibrierung der niedersächsischen SAPOS-Stationen entwickelt wurde, wird der Roboter in der Nähe der zu kalibrierenden Station aufgestellt. Der Roboter wird so gesteuert, dass seine Beobachtungen durch das Verfahren der Multipath-Dekorrelation³¹ praktisch mehrwegfrei sind.

2.6 Weitere Fehlereinflüsse bei der GNSS-Positionsbestimmung

2.6.1 Messrauschen

Fehler, die beim Empfänger entstehen, können wie schon erwähnt, unterschiedliche Ursachen haben. So ist eine Fehlerursache das sogenannte Messrauschen. Es handelt es sich um einen zufälligen Fehler, der durch Vorgänge im Empfänger das Signal beeinflusst. Das Messrauschen ist vom Signal-Rausch-Verhältnis am Eingang des Empfängers abhängig. Die Wirkung des Messrauschens ist proportional der Periodendauer des betreffenden Signals³². Außerdem wird durch das Messrauschen das Korrelationsverfahren bei der Entfernungsmessung beeinträchtigt.

Das Messrauschen eines geodätischen GNSS Empfängers liegt für Trägerphasen im Bereich von 1 mm und darunter.

2.6.2 Troposphärische und ionosphärische Einflüsse

Eine gemessene Entfernung entspricht im ungestörten Fall der Distanz zwischen den Phasenzentren von Satellit und GNSS-Empfangsantenne. Aufgrund der Atmosphäreninflüsse (im Wesentlichen bestehend aus Troposphären- und Ionosphäreneinfluss) weicht die gemessene Entfernung von der räumlichen Distanz ab, wobei der Einfluss auf die relative Positionsbestimmung mit zunehmender Basislinienlänge größer wird. Zudem ist der Atmosphäreneinfluss elevationsabhängig, da bei niedrigen Elevationen der Signalweg durch die Atmosphäre länger wird.

³¹ Vgl. Böder et al. (2001), S. 4

³² Vgl. Mansfeld (2010), S. 171

Der Troposphäreneinfluss kann durch Troposphärenmodelle korrigiert werden. Verbleibende Anteile können bei der GNSS-Auswertung als zusätzliche Parameter geschätzt werden. Der Einfluss der Ionosphäre kann hingegen durch 2-Frequenzmessungen eliminiert bzw. vermindert werden. Der Einfluss der Ionosphäre δs_{Ion} auf die gemessene Entfernung s ergibt sich in Abhängigkeit von der Trägerfrequenz f mit der Gleichung³³:

$$\delta s_{Ion} \approx -\frac{40,3}{f^2} \int_s n_e * ds = -\frac{40,3}{f^2}$$

Wobei n_e der Elektronengehalt entlang des Signalweges ist (TEC = total electron content). Da der Einfluss der Ionosphäre disperse ist, kann durch eine Linearkombination zweier Frequenzen eine nicht ionosphärenbeeinflusste Lösung berechnet werden.

$$s = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} * (s_{f_1} * f_1^2 - s_{f_2} * f_2^2)$$

Im Falle der GPS-Frequenzen L1 und L2 wird die ionosphärenfreie Linearkombination L0 entsprechend folgender Gleichung berechnet:

$$s = 2,5457 * s_{f_1} - 1,5457 * s_{f_2} \text{ bzw. } L0 = 2,5457 * L1 - 1,5457 * L2$$

Diese Linearkombination wird in der Literatur häufig auch mit LC oder L3 abgekürzt. Die Qualität der ionosphärenfreien Lösung hängt vom Frequenzabstand der verwendeten Frequenzen, der Ionosphärenaktivität sowie der Basislinienlänge ab. Eine generelle Anwendung der 2-Frequenzmessung kann nicht empfohlen werden, da sich die Messgenauigkeit entsprechend des Varianzfortpflanzungsgesetzes verschlechtert. Wird für L1 und L2 eine identische Genauigkeit angesetzt, so ergibt sich für die ionosphärenfreie Linearkombination bei Vernachlässigung sämtlicher Korrelationen und systematischer Messunsicherheiten, eine um Faktor 3 verringerte Messgenauigkeit³⁴.

$$\sigma_{s,L0} = \sqrt{2,5457^2 - 1,5457^2} * \sigma_{s,L1,L2} \approx 3 * \sigma_{s,L1,L2}$$

Dies bedeutet, dass bei der relativen Positionsbestimmung und der Verwendung von 2-Frequenzmessungen zur Verringerung des Ionosphäreneinflusses auch der Antenneneinfluss ansteigt.

³³ Leick, A. (1995)

³⁴ Leick, A. (1995)

2.6.3 Zenitverzögerung (Zenith Total Delay)

In Zenitrichtung durchquert das GNSS-Signal auf dem kürzesten Weg die Troposphäre. Bei niedrigen Elevationen ist das Signal einem größerem Refraktionseinfluss ausgesetzt. Daher ist die Verzögerung umso größer, je kleiner der Elevationswinkel des Satelliten ist. Mithilfe von Mappingfunktionen kann die Abhängigkeit vom Zenitwinkel modelliert werden. Darum wird von einer troposphärischen Zenitverzögerung (Zenith Total Delay bzw. ZTD) gesprochen.

2.6.4 Satellitenbahnfehler:

Die Positionsbestimmung hängt von der Bestimmung der Signallaufzeit und der Aufnahme der genauen Koordinaten der aktuellen Position eines Satelliten ab. Die aktuelle Position eines Satelliten wird aus den gesendeten Ephemeriden (präzise Bahndaten), die in den Navigationsmitteilungen enthalten sind, errechnet. Die Ephemeriden beschreiben in mathematischer Form die vorausberechnete Umlaufbahn eines Satelliten, womit ein Empfänger zu einem bestimmten Zeitpunkt die aktuelle Position eines Satelliten im Weltraum ermitteln kann. Es kommt jedoch zu leichten Störungen der Satellitenumlaufbahn. Diese Störungen können verschiedene Ursachen haben. Eine Ursache ist die Einwirkung der Schwerefelder von Mond und Sonne, wobei besonders das Schwerefeld des Mondes beträchtlichen Einfluss hat. Eine weitere Ursache ist der Strahlungsdruck, der von der Sonne auf die Satelliten ausgeübt wird. Außerdem werden die Bewegungen der Satelliten durch Reibungskräfte von der Restatmosphäre beeinflusst. Aus all solchen Gründen befinden sich die Satelliten nicht exakt auf der theoretisch berechneten Bahn, was sich wiederum auf die Positionsbestimmung auswirkt.

Um die Ephemeriden trotz der auftretenden Störungen stets präzise zu halten, werden die Satellitenbahnen durch das GPS-Bodensegment permanent beobachtet. Mithilfe der Daten aus den Beobachtungen werden die Bahndaten im Voraus berechnet. Die neu berechneten Bahndaten werden anschließend an die Satelliten übermittelt und stündlich auf den aktuellsten Stand gebracht. Um noch genauere Bahndaten zu erhalten, werden die Satelliten nicht nur durch das GPS-Bodensegment beobachtet, sondern zusätzlich von einer großen Anzahl weltweit verteilter Beobachtungsstationen. Diese Beobachtungsstationen gehören zum International GPS Service (IGS). Mit den exakt genauen Bahndaten lässt sich die Genauigkeit³⁵ der Positionsbestimmung erhöhen.

³⁵ Vgl. Zogg. (2015), S. 130-131.

2.6.5 Uhrenfehler der Satelliten

Bereits geringste Abweichungen der Uhren bewirken in den Empfängern gegenüber der Zeit der Atomuhren in den Satelliten beträchtliche Positionsfehler. Die höhere Genauigkeit der Atomuhren schützt diese jedoch nicht vor Störungen. Obwohl jeder Satellit mehrere Atomuhren besitzt und die Uhrzeit in den Satelliten durch die Atomuhren festgelegt wird, kommt es zu einer Zeitabweichung zwischen der Satelliten-Zeit und der GPS-Systemzeit. Der Grund liegt darin, dass die Atomuhren in den Satelliten durch die Gesetze der Relativitätstheorie beeinflusst werden. Das geschieht zum einen wegen der Geschwindigkeit eines Satelliten, da die Satellitenuhr relativ langsamer ist als eine nicht bewegende Uhr auf der Erdoberfläche und zum anderen wegen des geringen Schwerefeldes in der Satellitenbahn. Dadurch geht eine Satellitenuhr schneller als eine ruhende Uhr auf der Erdoberfläche. Der Uhrenfehler hat Einfluss auf die Genauigkeit der Bahndaten und somit auch auf die Genauigkeit der Entfernungsmessung. Dies liegt daran, dass die Ephemeriden einer falschen Zeit zugeordnet werden.

Die Abweichung der Satellitenzeit gegenüber der GPS-Systemzeit wird für jeden Satelliten in der Hauptkontrollstation festgelegt und mithilfe der Bodensendestationen an die betreffenden Satelliten übertragen. Die Satelliten übertragen dann die Zeitkorrekturparameter im ersten Unterrahmen der Navigationsmitteilung³⁶.

2.6.6 Einflüsse der Satellitengeometrie:

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung wird stark durch die Geometrie (räumliche Position) der Satelliten zum Empfänger beeinflusst. Hierfür wird der Begriff DOP verwendet, der für den Einfluss der Satellitengeometrie auf die Messungsgenauigkeit steht. Der DOP-Wert gibt die Abschwächung der Positionsgenauigkeit wieder. Es kann zwischen verschiedenen DOP-Werten³⁷ unterschieden werden:

- a. GDOP (Geometric DOP): Beschreibt den Einfluss der Satellitengeometrie und der Zeitmessung auf die Position im Raum (3D).
- b. PDOP (Positional DOP): Beschreibt den Einfluss der Satellitengeometrie auf die 3D-Position.
- c. HDOP (Horizontal DOP): Beschreibt den Einfluss der Satellitengeometrie auf die Position in der Ebene (2D).

³⁶ Vgl. Mansfeld (2010), S. 157

³⁷ Vgl. Zogg. (2015), S. 91

- d. VDOP (Vertical DOP): Beschreibt den Einfluss der Satellitengeometrie auf die Höhe (1D).
- e. TDOP (Time DOP): Beschreibt den Einfluss der Satellitengeometrie auf die Zeitmessung.

Die einzelnen DOP-Werte werden durch die Position des Empfängers und der Satelliten ermittelt und vom Empfänger selbst berechnet. Durch die Bewegung der Satelliten in ihren Umlaufbahnen kommt es ständig zur Veränderung der Satellitenkonstellation gegenüber dem Empfänger. Dadurch verändern sich die DOP-Werte stetig.

Der wichtigste DOP-Wert ist GDOP, er stellt die Fehlerangabe des gesamten Systems dar. Der GDOP-Wert besteht aus dem DOP-Wert für den Positionsfehler im Raum (3D) und dem DOP-Wert für die Uhrzeitabweichung. Er berechnet sich³⁸ folgendermaßen.

$$GDOP = \sqrt{(PDOP)^2 + (TDOP)^2}$$

Somit ist der GDOP-Wert abhängig vom Ort des Empfängers und von der Zeit. Wenn mehr als vier Satelliten in Sicht sind, wählt der Empfänger zur Positionsbestimmung diejenigen vier Satelliten aus, die den günstigsten GDOP-Wert ergeben haben. Mit einem günstigen GDOP-Wert ergibt sich somit die geometrisch günstigste Satellitenkonstellation.

³⁸ Zogg (2015), S. 97.

3 Konzept der Untersuchung

3.1 Auswahl und Aufnahme der geeigneten Messdaten

Für die Untersuchung wurden vier Langzeit-GNSS-Messungen durchgeführt von jeweils 24-stündiger Dauer. Sie fanden am 19. Februar und 20. Februar 2019 statt. Die Messungen fanden auf den zwei Testpfeilern des Daches des Landesamtes für Breitband, Digitalisierung und Vermessung München statt. Auf dem gleichen Dach in Entfernung von ca. 2,7m von den Testpfeilern befindet sich die Münchner Referenzstation (Abb. 14) des SAPOS-Netzes. Die Referenzstation München und ihre Messdaten wurden für die hochgenaue Koordinatenbestimmung der zwei Pfeiler benutzt.

Die Platzierung der zwei Antennen auf den Pfeilern (Abb. 14 und 15) war folgende:

- 19.02.2019 für 24 Stunden: Leica AR.25 am Nordpfeiler und Trimble Chokering mit Radome am Südpfeiler (Abb. 14).
- 20.02.2019 für 24 Stunden: Leica AR.25 am Südpfeiler und Trimble Chokering mit Radome am Nordpfeiler (Abb. 15).



Abb. 14: am 19.02.2019: Links auf dem Nordpfeiler die Leica AR. 25 und direkt rechts davon auf dem Südpfeiler die Trimble Chokering Antenne. Weiter rechtsunten ist die Referenzstation von München sichtbar.



Abb. 15: am 20.02.2019: Links auf dem Südpfeiler die Leica AR. 25 und rechts auf dem Nordpfeiler die Trimble Chokering Antenne.

Dazu kommt noch die SAPOS-Referenzstation in Pfaffenhofen, bei der die automatisch aufgezeichneten Daten (bzw. für den SAPOS-Dienst benötigte Daten) vom 19. und 20. Februar für den langen Basislinientest benötigt wurden.

Die folgende Tabelle (Tab. 1) soll zur Vereinfachung der obigen Angaben dienen:

Stationen:	Antenne am 19.02.2019	Antenne am 20.02.2019	Aufgezeichnete Daten	Einsatz der Messdaten
Pfeiler Süd	Trimble Chokering 59.8000	Leica AR.25	RINEX 3.03	Nullbasislinientest, kurze- und lange Basislinie
Pfeiler Nord	Leica AR.25 R.4	Trimble Chokering	RINEX 3.03	Nullbasislinientest, kurze- und lange Basislinie
Referenzstation Pfaffenhofen	Trimble Chokering	Trimble Chokering	RINEX 3.03	Lange Basislinie
Referenzstation München	Trimble Chokering	Trimble Chokering	RINEX 3.03	Koordinatenbestimmung der zwei Pfeiler

Tab. 1: Teststationen und verwendete Referenzstationen

3.1.1 Aufzeichnung von Messdaten

Die Messdaten (bei den beiden Pfeilern) wurden mittels einem Septentrio Pola Rx5 GNSS-Empfänger aufgezeichnet. Die Abgabe der Daten erfolgt im herstellerunabhängigen Standardformat RINEX. Unsere Messdaten wurden sozusagen im Postprocessing Verfahren später ausgewertet.

Aufgezeichnet wurden Daten von allen sichtbaren Satelliten der vier Hauptsatellitensysteme. Die verschiedenen Frequenzen des jeweiligen Satellitensystems wurden vollständig aufgezeichnet. Außerdem, wurden auch die vollständigen Ephemeriden bzw. Positionswerte des jeweiligen Satelliten abgespeichert.

Die vier Satellitensysteme und deren Frequenzen sind folgende:

- a) GPS / Navstar (USA): mit L1, L2 und L5 Frequenzen.
- b) GLONASS (Russland): mit R1, R2, und R3 (bzw. L1, L2, und L3) Frequenzen.

c) Galileo (Europa): mit E1, E5a, E5b und E6 Frequenzen.

d) BeiDou / Compass (China): mit B1, B2 und B3 Frequenzen.

Anbei folgt eine Abbildung (Abb. 16³⁹) der unterschiedlichen Frequenzbereiche der vier Satellitensysteme:

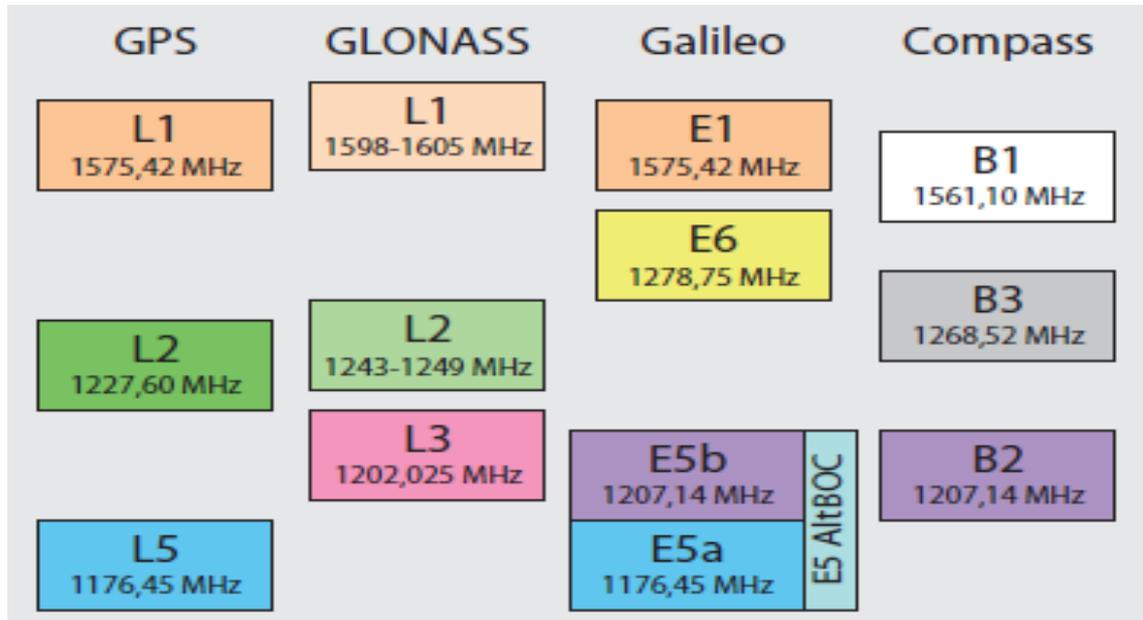


Abb. 16: Frequenzbereiche der Satellitennavigationssysteme GPS, GLONASS, Galileo und Compass bzw. BeiDou. Identische Farben markieren die Interoperabilität der Signale.

3.2 Verwendete Antennen

Chokering Antennen

Für die Messungen wurden zwei unterschiedliche Chokering Antennen benutzt. Choke-Ring-Antennen sind rotationssymmetrische Antennen. Sie bestehen aus einer zentralen Antenne und einer Reihe konzentrisch dazu angeordneter metallischer Zylinder, die als Direktoren wirken und deren Höhe nach außen hin abnimmt. Durch deren spezielle Bauform und Anordnung der rotationssymmetrischen Zylinder können sie Mehrwegeempfang, also den Empfang eines Signals direkt und zusätzlich über Reflexionen, verhindern. Dadurch sind Chokering Antennen gut geeignet, um über die Signallaufzeit Entfernungsmessungen zum Sender durchzuführen.

³⁹ Steinberger et al. (2013), S.55

3.2.1 Leica AR.25. R.4

Die Leica AR.25. (Model: R4 bzw. Revision 4) ist eine Chokering Antenne (Abb. 17) mit 3D-Design. Dieses Design ermöglicht besten Empfang bei niedrig stehenden (bzw. bei Elevationen unter 5°) Satelliten und die Reduzierung von Mehrwegeeffekten. Darüber hinaus ist es eine sehr robuste und hochqualitative GNSS-Chokering-Antenne, die auch höchste Phasen-Zentrumsstabilität leistet. Des Weiteren kann sie generell sehr gut Multipatheffekte und unterschiedliche Störsignale unterdrücken.



Abb. 17: Die Leica AR.25 Antenne aus unterschiedlichen Perspektiven.

3.2.2 Trimble Chokering TRM 59.8000

Die Trimble Chokering (Modell: TRM 59.8000) ist eine Chokering Antenne mit 2D-Design. Sie kann auch sehr gut niedrig stehende Satelliten (bzw. Elevationen unten 5°) empfangen. Sie weist eine sehr hohe Phasenzentrumstabilität auf, die nach Präzisionstests nicht mehr als 2mm abweicht. Die Trimble Chokering Antenne (Abb. 18) hat auch eine sehr gute Mehrwegeeffekte Reduzierung und schirmt Störsignale stark ab. Die Trimble Chokering Antenne, die für die Untersuchungen benutzt wurde, besitzt eine Wetterschutzhaube (Radome). Mit diesem Radome wurde sie auch in der Antennenmesskammer und mit dem Roboter kalibriert.



Abb. 18: Links: Trimble Chokering ohne Radome. Rechts: Trimble Chokering mit Radome.

3.3 Verwendete Software

3.3.1 Wanninger Software (WaSoft)

Die Wanninger Software (WaSoft) war die Haupt-Software, die für die Untersuchungen benutzt wurde. Mit der WaSoft wurden die RINEX-Daten der Beobachtungen bearbeitet, manipuliert, berechnet und ausgewertet.

WaSoft wurde von Herrn Lambert Wanninger, als Software zur Koordinatenberechnung, aus GNSS-Messungen mit deren Referenzdaten entworfen. WaSoft ist eine kommandozeilenbasierte Software. Die Module von WaSoft, die bei den Untersuchungen verwendet wurden und aus dem WaSoft User's Guide 2018⁴⁰ beschrieben werden sind folgende:

➤ WaRINo und WaRINn:

Diese zwei Module dienen der Bearbeitung und der statistischen Aufbereitung von GPS/GLONASS/Galileo/BeiDou/SBAS/QZSS/NavIC-Daten, die im RINEX-Format vorliegen. WaRINo ist für Beobachtungsdateien geeignet, WaRINn für Ephemeridendateien. Beide Module ermöglichen Formatwandlungen von RINEX 2 nach 3 und umgekehrt.

Mit WaRINo können Veränderungen an den Informationen im Dateikopf vorgenommen werden und es ist u.a. möglich, Beobachtungen nach unterschiedlichen Kriterien zu selektieren oder mehrere Dateien derselben Station zu einer Datei zusammenzufassen. Für jede Ausgabedatei werden statistische Informationen erzeugt.

WaRINo bietet darüber hinaus auch spezielle Manipulationsmöglichkeiten der Beobachtungsgrößen: Korrektur der Antennenphasenzentrumsfehler, Interpolation von zusätzlichen GNSS-"Beobachtungen" und Verlagerung der Antennenposition.

➤ Wa2:

Der Basislinien-Prozessor Wa2 wurde für die Integration in solche Anwendungsprogramme entwickelt, die eine GNSS-Basislinienauswertung im Post-Processing anbieten wollen. Aus den im RINEX-Format vorliegenden GPS / GLONASS / Galileo / BeiDou / SBAS / QZSS / NavIC-Beobachtungen zweier Stationen berechnet Wa2 Basislinienkoordinaten mit Genauigkeiten - je nach vorliegendem Beobachtungsdatenmaterial - auf Submeter-, Dezimeter-, Zentimeter- oder Millimeter-Niveau. Werden für die erste der beiden Stationen präzise Koordinaten vorgegeben, so ergeben sich für die zweite Stati-

⁴⁰ Wanninger (2018).

on absolute Koordinaten im selben Referenzsystem, die als kartesische, ellipsoidische und UTM-Koordinaten ausgegeben werden.

Wa2 greift auf schnelle und ausgereifte Algorithmen für die Mehrdeutigkeitslösung zurück, um bei Basislinienlängen bis zu einigen Kilometern oder bei Verwendung einer virtuellen Referenzstation (VRS) kurze Beobachtungszeiten zu ermöglichen. Es werden sowohl Einfrequenz- als auch Zweifrequenzdaten bearbeitet. Korrekturen für die Antennenphasenzentren können eingeführt werden. Wa2 besitzt aber auch alle Eigenschaften, um lange Basislinien (bis wenige 100 km) mit höchster Genauigkeit auszuwerten. Einflüsse durch Ionosphäre und Troposphäre werden adäquat modelliert. Präzise Satellitenbahnen können verwendet werden. Ein ionosphären-resistenter Mehrdeutigkeitslösungsalgorithmus sorgt für hohe Festsetzungsquoten bei den Mehrdeutigkeiten.

Wa2 ist auf eine automatische Prozessierung ohne Nutzereingriff ausgelegt. Die Ergebnisse können in verschiedenen Formaten, die z.T. durch den Nutzer individuell konfiguriert werden können, ausgegeben werden.

3.3.2 Leica Infinity

Infinity ist die neue Software der Firma Leica, die für die Übertragung und Bearbeitung von Messdaten aus dem Feld ins Ingenieurbüro entwickelt wurde.

Bei unseren Untersuchungen wurde die Infinity Software für die Berechnung von den kurzen und langen Basislinien benutzt. Die Berechnungen dienen zum direkten Vergleich mit den Ergebnissen für die kurzen und langen Basislinien mittels der WaSoft. Dieser Vergleich sollte der Beweis für identische oder fast identischen Ergebnissen sein und somit das Auswertungsverfahren bestätigen.

Einige untersuchungsrelevante Software-Eckdaten von Infinity sind folgende:

- Moderne Benutzeroberfläche mit 3D-Ansichten.
- Graphische Bedienung bei den GNSS-Auswertungen.
- Sehr geringe Manipulationsmöglichkeiten der Messdaten.
- Detaillierte Auswertungsprotokolle, die aber trotzdem eindeutig weniger Informationen liefern als die Auswerteprotokolle der WaSoft.
- Möglichkeit zur Wahl unterschiedlicher Troposphärenmodelle bei der Auswertung.

3.4 Analyse der Ausgangsdaten

3.4.1 Postprocessing und Speicherung der Daten im RINEX-Format

Wie schon vorher erläutert wurden die Postprocessing-Daten der zwei Pfeiler über dem Empfänger im RINEX Format abgespeichert.

Was ist Postprocessing?

Es ist die nachträgliche, genauere Auswertung der Strecken- oder Phasenmessungen mit endgültigen Bahndaten, während die online-Ortsbestimmung nur vorläufige Daten zur Verfügung stellt.

Postprocessing wird sowohl für präzise Positionsbestimmungen von kinematischen und statischen Messungen als auch für Positionsbestimmungen mit Differential-GPS (zwei oder mehr Satellitenempfänger) genutzt.

Was ist RINEX?

Receiver Independent Exchange Format (RINEX) ist ein empfängerunabhängiges Daten-Speicher- und Austauschformat. Es wird für GPS- oder heutzutage allgemeiner GNSS-Rohdaten verwendet, also insbesondere für Pseudostreckenmessungen aus Code- oder Trägerphasenbeobachtungen und die Satellitenephemeriden.

Die Bereitstellung dieser Daten ermöglicht eine nachträgliche Neuauswertung, meist zur Bestimmung von Positionslösungen höherer Genauigkeit. Die zwei RINEX-Formate, die momentan benutzt werden, sind RINEX 2 und RINEX 3. Die aktuellste Version von RINEX ist die 3.04 (seit Dezember 2018).

3.4.2 Einzelschritte zur Analyse der Daten.

Um eine bessere Übersicht (Abb. 19) über die einzelnen Schritte zu ermöglichen, wird in diesem Teil ein Pfeildiagramm verwendet. Dieses Diagramm beschreibt den Weg von der Aufzeichnung der Daten bis zur Umwandlung der RINEX-Daten im Endformat.

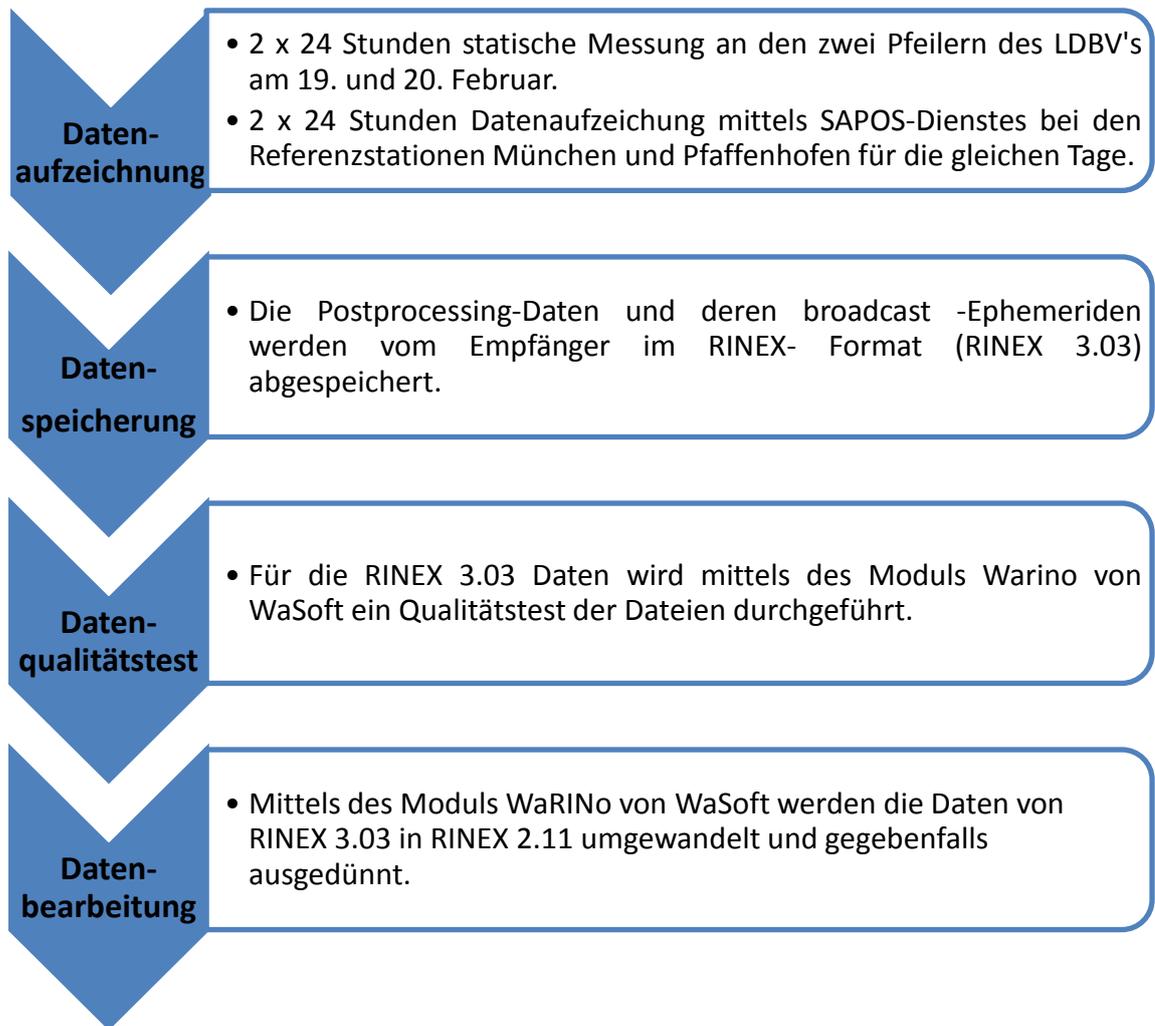


Abb. 19: Einzelschritte zur Analyse der Daten.

Zur weiteren Ergänzung der Einzelschritten wird der Qualitätstest der RINEX-Daten in der WaSoft und die Umwandlung der RINEX-Daten erklärt.

Der Qualitätstest wird aus folgenden Gründen durchgeführt:

- Zur Identifizierung und Beseitigung von Formatierungsfehlern.
- Zur Identifizierung von Fehlern am Dateikopf.
- Für die Ausgabe statistischer Angaben.
- Zum Detektieren ungesetzter Cycle-Slips.
- Zur Identifizierung und Beseitigung von Millisekundersprüngen in der Empfangszeit.

Die Bearbeitung bzw. Formatwandlung von RINEX 3.03 nach 2.11 wurde der einfacheren Bearbeitung wegen in dem Zielformat durchgeführt.

Der nächste Schritt war die Ausdünnung verschiedener RINEX 2.11 Dateien. Die Ausdünnung von bestimmten Beobachtungen und Frequenzen einiger RINEX 2.11 Dateien

war für verschiedene Unterkategorien der Untersuchungen hilfreich. Die Unterkategorien sind je nach Auswertestrategie der Multi GNSS-Auswertung eingeteilt. Die Auswertestrategien werden im Unterkapitel 3.6 umfangreich beschrieben. Dazu werden auch die unterschiedlichen Ausdünnungen der Beobachtungen verdeutlicht.

3.5 Aufbau und Analyse der Antennenkalibrierungen

Bei der absoluten Punktbestimmung hängt die Notwendigkeit der Berücksichtigung von Antennenkorrekturen vom Messverfahren und der daraus resultierenden Positionsgenauigkeit ab. Bei hochpräzisen Messverfahren gehören die Antenneneinflüsse neben Troposphären-, Mehrwege- und Nahfeldeinflüssen zu den dominierenden Einflussgrößen, so dass die Anbringung von PCO (Phase Center Offset) - und PCVs (Phase Center Variations) - Korrekturen notwendig ist, wobei stets die Effekte der Antennen auf beiden Stationen zu berücksichtigen sind. Die PCO- und PCV-Korrekturen wurden im Unterkapitel 2.2. ausführlich beschrieben und erklärt.

In diesem Teil der Arbeit wird zuerst das ANTEX-Format der Antennenkorrekturdaten erläutert, was wichtiger Bestandteil dieser Untersuchungen war. Anschließend werden die individuellen Kalibrierungen der Antennenmesskammer und des Roboters von Geo++ näher erläutert, weil diese individuellen Kalibrierungen für jegliche Berechnungen genutzt wurden. Darauf aufbauend werden die einzelnen Schritte zur Nutzung dieser Kalibrierungen bei der Auswertung dargestellt.

3.5.1 ANTEX-Format der Antennenkorrekturdaten

Heutzutage wird in fast allen geodätischen GNSS-Auswerteprogrammen (logischerweise auch bei der Wanninger Software – WaSoft und der Leica Infinity) das ANTEX-Format (Antenna-Exchange-Format) als Datenaustauschformat bei Antennenkorrekturdaten genutzt. Auch im SAPOS wird hauptsächlich im ANTEX-Format bei Antennenkorrekturdaten gearbeitet.

Eine ausführliche ANTEX-Formatbeschreibung befindet sich auf der Homepage des IGS⁴¹. Die wichtigsten Informationen, die im Header einer ANTEX-Datei zu finden sind, werden hier zusammengefasst:

- In der ersten Zeile stehen die verwendeten Satellitensysteme (G=GPS; R=GLONASS; E=Galileo; B=Beidou).

⁴¹ <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/216104678-ANTEX-format-description>

- In der zweiten Zeile erfolgt die Angabe des Kalibrierungstyps: "A" für eine absolute Kalibrierung, "R" für eine relative Kalibrierung.
- Es folgen ab der "START OF ANTENNA" Zeile die antennenspezifischen Angaben (Typ- und Seriennummer-Bezeichnung) und Angaben über die Form der Antennenparameter (die Schrittweite der Azimut bzw. DAZI und Zenitdistanzwerte bzw. DZEN).
- Die eigentliche Ausweisung der Antennenparameter befindet sich bei "START OF FREQUENCY". Da werden sie nach Frequenzen getrennt.
- Es folgen mit dem Zeilenauf Ruf "NORTH / EAST / UP" die PCO-Werte (mit der Bezeichnung "NOAZI") und die PCV-Werte ohne Azimut-Abhängigkeit. Bei den PCV-Werten mit Azimutabhängigkeit wird dies durch die jeweils entsprechend vorangestellte Gradzahl kenntlich gemacht.

3.5.2 Individuelle Kalibrierungen

Eine bestmögliche Elimination der azimut- und elevationsabhängigen Antenneneinflüsse wird durch die Verwendung antennenspezifischer Kalibrierwerte erreicht. Die individuelle Kalibrierung von Antennen ist dann zu empfehlen, wenn hochgenaue Positionen angestrebt werden.

Werden individuelle Kalibrierwerte verwendet, kann für den Bereich von 10° bis 90° Elevation eine Reduktion der richtungsabhängigen Phasenvariationen auf 1 bis 2 mm erreicht werden⁴² (gilt für die GPS-Frequenzen L1 und L2). Die Größenordnung der verbleibenden Kalibrierunsicherheiten ist vom verwendeten Antennentyp abhängig. Im Allgemeinen gilt, dass gut geschirmte Antennen (z.B. Choke-Ring-Antennen) mit einer höheren Genauigkeit kalibriert werden können als zum Beispiel Rover-Antennen.

Ursache hierfür ist der Einfluss des Antennennahfelds, der zu einer systematischen Veränderung des Antennenempfangsverhaltens führen kann. Daraus resultiert, dass Kalibrierergebnisse bei veränderter Antennenumgebung nur noch bedingt gültig sind.

Typ-Kalibrierungen

Die Verwendung von Antennentypkorrekturdaten wird empfohlen, wenn eine individuelle Kalibrierung nicht möglich ist oder nur geringere Genauigkeitsanforderungen vorliegen. Inwieweit das Typmittel repräsentativ für eine individuelle Antenne ist, hängt

⁴² DVW-Merkblatt, 1/2011, S. 4.

stark vom verwendeten Antennentyp ab. Bei modernen Antennen sind Abweichungen von mehr als 3 mm⁴³ (PCO & PCV) selten.

Da, bei diesen Untersuchungen keine Typkalibrierung eingesetzt wurde, wird auf das Typ-Kalibrierungsverfahren nicht weiterhin eingegangen.

Antennemesskammer Bonn (individuelle Kalibrierungen)

Die für die Untersuchungen genutzten Antennen (sowohl die Trimble Chokering als auch die Leica AR.25) wurden in den letzten Jahren in der Antennemesskammer in Bonn in 3G⁴⁴ oder in 4G⁴⁵ Satellitensysteme kalibriert.

Es wurden insgesamt drei (3) verschiedene Antennemesskammer-Kalibrierungen eingesetzt. In folgender Tabelle (Tab. 2) werden die Eckdaten der Kalibrierungen gezeigt:

Antennentyp	Antennennummer	Datum der Kalibrierung	Art der Kalibrierung	3G oder 4G	Kalibrierte Frequenzen
Leica AR. 25 R.4 LEIT	726857	18.05.2018	individuell	4G	L1, L2, G5, R1, R2, R3, E1, E5a, E5b, E6, B1, B2, B3
Trimble Chokering SCIS 59.8000	5516356126	07.12.2017	individuell	4G	L1, L2, G5, R1, R2, R3, E1, E5a, E5b, E6, B1, B2, B3
Trimble Chokering SCIS 59.8000	4943353582	25.10.2013	individuell	3G	L1, L2, G5, R1, R2, R3, E1, E5a, E5b, E6.

Tab. 2: Eckdaten der individuellen Antennemesskammer Kalibrierungen.

Die Antennennummern der zwei Antennen, die für die Tests aufgestellt worden sind, waren folgende:

- Antennennummer 4943353582 für die Trimble Chokering 59.8000 SCIS.
- Antennennummer 726857 für die Leica AR 25.R4 LEIT.

⁴³ DVW-Merkblatt, 1/2011, S. 4-5.

⁴⁴ 3G: GPS, GLONASS, Galileo.

⁴⁵ 4G: GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou.

Warum wurden aber drei (3) Kalibrierungen eingesetzt, auch wenn nur zwei (2) Antennen für die Tests genutzt wurden?

- Es wurden individuelle Kalibrierungen mit der Original-Antennennummer der Trimble Antenne für die Untersuchungen der Basislinienberechnung eingesetzt, aber auch eine individuelle Kalibrierung einer Trimble Antenne mit einer anderen Antennennummer. Der Grund dafür war der direkte Vergleich der Ergebnisse einer realen und einer „nicht-realen“ Basislinienberechnung.

Roboter (individuelle Kalibrierungen)

Auch bei dem Roboter von Geo++ wurden beide Antennen in den letzten Jahren individuell kalibriert. Der Roboter von Geo++ kalibriert aber nach wie vor nur in 2G⁴⁶ Satellitensysteme.

Die eingesetzten Kalibrierungen waren auch hier drei (aus demselben Grund wie bei den Kalibrierungen der Antennenmesskammer). In folgender Tabelle (Tab. 3) werden die eingesetzten Kalibrierungen im Detail aufgelistet:

Antennentyp	Antennennummer	Datum der Kalibrierung	Art der Kalibrierung	Kalibrierte Frequenzen
Leica AR. 25 R.4 LEIT	726857	22.06.2018	individuell	L1, L2, R1, R2.
Trimble Chokering SCIS 59.8000	5516356126	21.03.2018	individuell	L1, L2, R1, R2.
Trimble Chokering SCIS 59.8000	4943353582	08.02.2019	Individuell	L1, L2, R1, R2.

Tab. 3: Eckdaten der individuellen Roboter Kalibrierungen.

⁴⁶ 2G: GPS, GLONASS.

3.6 Auswertung der Daten/Testausführung

Wie schon in der Einleitung (Unterkapitel 1.2) angesprochen werden die Untersuchungen in drei (3) Hauptkategorien geteilt.

Der erste Teil der Untersuchungen befasst sich mit dem Nullbasislinientest von unseren zwei Pfeilern und deren Auswertung mit 10° Elevationsgrenze und in unterschiedlichen Frequenzkombinationen. Anschließend werden die Nullbasislinientests in verschiedenen Elevationen zwischen 0° und 20° (in 2.5° - Schritten) durchgeführt und die Ergebnisse analysiert.

Der zweite Teil befasst sich mit den kurzen Basislinientests bzw. der Koordinatenbestimmung der zwei Pfeilern, um die exakte Lage- und Höhengenaugigkeit von kurzen Basislinien in L1 und L5 Frequenz-Lösung mittels der WaSoft und der Infinity Software festzustellen und vergleichen.

Außerdem, wurden auch zwei kurze Basislinien (vor Beginn der drei Hauptuntersuchungen) zwischen der Referenzstation München und den zwei Pfeilern berechnet für die Bestimmung der hochgenauen Lage- und Höhekoordinaten (fast absolut) der Pfeiler. Diese Koordinaten wurde bei den Untersuchungen als Näherungskordinaten bei den Pfeilerbeobachtungen genutzt und nachher für den Vergleich der Lage- und Höhenunterschiede bei Einsatz unterschiedlicher Frequenzen.

Der dritte Teil befasst sich mit den langen Basislinientests zwischen den Pfeilern und der SAPOS-Referenzstation von Pfaffenhofen. Unter Berücksichtigung der Troposphäre (mittels der Troposphärenlösung) und weiterer Parameter werden die Koordinaten der Teststationen berechnet und die Lage- und Höhenunterschiede analysiert.

3.6.1 Nullbasislinientest

Die 24-Stunden Beobachtungsdaten der zwei (2) Pfeilern wurden in diesem Teil der Arbeit für die Berechnung einer Nullbasislinie genutzt. Nachdem bei den Nullbasislinien zwei 100% identische Beobachtungen der gleichen Antenne eingesetzt werden ist jeglicher Lage- und Höhenunterschied Beobachtungsunabhängig da diese rausfallen.

Von was wird dann dieser Lage- und Höhenunterschied erzeugt?

Die Lage- und Höhendifferenzen werden von den unterschiedlichen Kalibrierungen bzw. Kalibrierverfahren, die den zwei identischen Beobachtungen zugewiesen werden. Welche diese kalibrierungsabhängigen Einflüsse sind und wie groß deren Wert ist werden in Kapitel 4 und 5 analysiert und bewertet.

Als folgt die Unterteilung des Nullbasislinietest in den Vergleich der Einflüsse von unterschiedlichen Kalibrierungen auf 10° Elevationsgrenze und in den Vergleichen der Einflüsse bei unterschiedlichen Elevationen.

Höhenunterschiede bei 10° Elevation

In diesem Teil wurde ausschließlich mit der Wanninger Software gearbeitet, da bei Leica Infinity nicht die Möglichkeit des Mischens von unterschiedlichen Antennenkalibrierungen (Roboterkalibrierung gegenüber Kammerkalibrierung und umgekehrt) besteht.

Bei der kommandozeilenbasierenden Wanninger Software wurden die RINEX-Dateien und die ANTEX-Dateien in eine Windows-Batchdatei eingefügt. Das Modul von WaSoft das für die Berechnungen der Nullbasislinien benutzt wurde, war das „wa2“.

Wie sieht eine Kommandozeile einer Batchdatei eigentlich aus?

```
„wa2 Referenz.19o Rover.19o +ACT3 +AC1FLEIAR25.R4_LEIT_726857_AMK4.atx  
+AC2FLEIAR25.R4_LEIT_726857_RFK2.atx +TL1 +L2 +U32 -e10 +FLLEI_L1.txt“
```

Zur näheren Betrachtung wird jeder Teil dieser Batchdatei einzeln erklärt.

- **wa2**: der Befehl um des WaSoft Modul aufzurufen.
- **Referenz.19o** = Hier wird die 24-Stunden Beobachtungsdatei eingesetzt, die identisch mit der Roverdatei ist. In diesem Fall ist es eine Leica Beobachtung.
- **Rover.19o** = Hier wird die gleiche 24-Stunden Beobachtungsdatei eingesetzt wie bei der Referenzdatei. Somit sind Referenz und Rover bei dieser Basislinie identisch.
- **ACT3** = Das Antennenkorrektur Toleranzlevel. In diesem Fall ist es das Toleranzlevel drei (3) was das höchste Toleranzlevel ist.
- **AC1FLEIAR25.R4_LEIT_726857_AMK4.atx** = die Antennenkorrekturdatei (ANTEX-File), die der Referenzdatei zugewiesen wird. In diesem Fall ist es ein ANTEX-File einer 4G-Kalibrierung der Antennenmesskammer Bonn.
- **AC2FLEIAR25.R4_LEIT_726857_RFK2.atx** = die Antennenkorrekturdatei (ANTEX-File), die der Roverdatei zugewiesen wird. In diesem Fall ist es ein ANTEX-File einer 2G-Kalibrierung des Roboters von Geo++.
- **TL1** = Die Auswahl der Frequenzlösung für die Auswertung. Hier wird eine L1 Frequenzlösung aufgerufen.
- **L2** = Die „L2“ Eingabe hilft bei der Bewertung der Qualität und Vollständigkeit der interpolierten Beobachtungen, hat aber keinen Zusammenhang mit der Frequenzenauswahl.
- **U32** = Bezieht sich auf die Koordinaten der Ausgabedatei. Es bedeutet, dass die Koordinatenausgabe auch in UTM32 erfolgt.
- **-e10** = Hier wird die Elevationsgrenze angegeben. Hier liegt die Grenze bei 10°.

- **FLLEICA_L1.txt** = Die Ausgabedatei des „wa2“ Befehls, in der alle Informationen zur Auswertung beinhaltet sind und die Koordinatenergebnisse der Rover Datei beinhaltet sind.

Die Auswerteeckdaten und Vorgehensweise werden hiermit besser durchleuchtet.

Insgesamt waren es fünf (5) unterschiedliche Frequenzkombinationen, die berechnet wurden und somit auch ihre Lage- und Höhendifferenzen.

1. G1/R1/E1/B1 mit Standardtroposphäre bzw. L1-Lösung. Die L1-Frequenzlösung ist die typische Auswertung von Vermessungsingenieuren im Außendienst.

2. G2/R2/E5/B2 mit Standardtroposphäre bzw. L2-Lösung.

3. G5/R3/E5/B3 mit Standardtroposphäre bzw. L5-Lösung.

4. L0t = Ionosphärenfreie Kombination G1/R1/E1/B1 und G2/R2/E5a/B2 und die berechnete Troposphäre. L0t ist die typische Frequenzlösung bei dem geodätischen Grundnetz in Bayern und dem Referenzstationsnetz der Landesvermessung.

5. L0Et oder auch L5Et = Ionosphärenfreie Kombination G1/R1/E1 und G5/R3/E5a und Berechnete Troposphäre.

Bei den Optionen 3. und 5. geschieht vor der Auswertung eine Löschung aller G2/R2/B2-Beobachtungen in den Ausgangsdaten. Somit geht die Anzahl der Zweifrequenzbeobachtungen von ca. 43000 auf ca. 13000 zurück (bzw. - 70% von den Zweifrequenzbeobachtungen).

Die vier (4) Blöcke der Auswertung der Nullbasislinien werden hier (Tab. 4) dargestellt:

Antennen bei Referenz und Rover	Südpfeiler oder Nordpfeiler?	Datum der 24-Stunden Messung	ANTEX-Referenz	ANTEX-Rover	Auswertestrategie
Trimble 59.8000 SCIS	Südpfeiler	19.02.2019	RFK2 ⁴⁷	AMK4 ⁴⁸	L1, L2, L5, L0t, L0Et
Trimble 59.8000 SCIS	Nordpfeiler	20.02.2019	RFK2	AMK4	L1, L2, L5, L0t, L0Et
Leica AR.25 R4 LEIT	Nordpfeiler	19.02.2019	RFK2	AMK4	L1, L2, L5, L0t, L0Et
Leica AR.25 R4 LEIT	Südpfeiler	20.02.2019	RFK2	AMK4	L1, L2, L5, L0t, L0Et

Tab. 4: Auswertungsvarianten bei dem Nullbasislinientest.

⁴⁷ RFK2 = Roboterfeldkalibrierung in 2G.

⁴⁸ AMK4 = Antennenmesskammerkalibrierung in 4G.

Zu der Auswahl der ANTEX-Files zwischen Referenz und Rover muss ergänzt werden, dass kein Tausch der Plätze von Roboter und Antennenmesskammer nötig ist, da sich das Ergebnis des Höhenunterschiedes nur um das Vorzeichen ändern wird.

Für die Trimble Antenne wurden zwei unterschiedliche individuelle Kalibrierungen (wie schon im Unterkapitel 3.5.2. beschrieben) von zwei unterschiedlichen Antennennummern eingesetzt. Die zwei Antennennummern waren folgende:

- Trimble 59.8000 SCIS mit Nummer 4943353582
- Trimble 59.8000 SCIS mit Nummer 5516356126

Die Trimble Antenne mit der Nummer: 4943353582 ist die „reale“ Antennennummer. Die andere, nicht bei unseren Tests verwendete Trimble Antenne dient zum direkten Vergleich der Auswirkung von unterschiedlichen individuellen Kalibrierungen bei sehr ähnlichen Antennen. Die „reale“ Trimble Antenne wurde in der Antennenmesskammer 3G-kalibriert (AMK3) bzw. in GPS, Glonass und Galileo Frequenzen.

Für die Leica Antenne wurden nur die Kalibrierungen der „realen“ Antennennummer benutzt.

Höhenunterschiede bei unterschiedlichen Elevationsgrenzen (von 0° bis 20°)

Die Vorgehensweise bei den Nullbasislinientests mit unterschiedlichen Elevationen, um die Lage- und Höhenunterschiede zu ermitteln, war fast identisch mit dem Nullbasislinientest bei einer Elevationsgrenze von 10°. Der einzige Unterschied ist, dass bei der Batch-Datei die Elevationsgrenze zwischen 0° und 20° (immer in 2.5° - Schritten) eingesetzt wurde. Wie sich die Höhenunterschiede bei unterschiedlichen Elevationen verändern, wird in Unterkapitel 4.2.2. mit den Ergebnissen dargestellt.

Insgesamt waren es auch hier fünf (5) unterschiedliche Frequenzkombinationen, die berechnet wurden, um Lage- und Höhendifferenzen zu ermitteln.

1. G1/R1/E1/B1 mit Standardtroposphäre bzw. L1-Lösung.
2. G2/R2/E5/B2 mit Standardtroposphäre bzw. L2-Lösung.
3. G5/R3/E5/B3 mit Standardtroposphäre bzw. L5-Lösung.
4. L0t = Ionosphärenfreie Kombination G1/R1/E1/B1 und G2/R2/E5a/B2 und die berechnete Troposphäre.
5. L0Et oder auch L5Et = Ionosphärenfreie Kombination G1/R1/E1 und G5/R3/E5a und berechnete Troposphäre.

3.6.2 Kurze Basislinie

Im Testteil mit kurzen Basislinien wurde sowohl mit der WaSoft als auch mit der Leica Infinity Software gearbeitet.

Die Daten, die für die Berechnungen genutzt wurden, waren die gleichen 24-Stunden Beobachtungsdateien der zwei Pfeiler, die am 19.02.2019 und 20.02.2019 aufgezeichnet wurden. Die Berechnungen wurden in zwei (2) Kategorien unterteilt, bzw. in zwei Frequenzkombinationen:

- G1/R1/E1/B1 mit Standardtroposphäre bzw. L1-Lösung.
- G5/R3/E5/B3 mit Standardtroposphäre bzw. L5-Lösung.

Von diesen Frequenzkategorien gab es jeweils 4 Unterkategorien der Kombinationen von Antennenkalibrierungen. Die Kombinationen von Kalibrierungen, die der Referenz und dem Rover in der Auswertung zugeteilt worden sind, waren folgende:

- i. AMK4 vs RFK2: Die Kombination, bei der die Referenz eine 4G-Antennenmesskammerkalibrierung zugewiesen bekommt und der Rover eine 2G-Roboterfeldkalibrierung.
- ii. RFK2 vs RFK2: Bei dieser Kombination werden sowohl der Referenz als auch dem Rover 2G-Roboterfeldkalibrierungen zugewiesen.
- iii. RFK2 vs AMK4: Hier wird der Referenz eine 2G-Roboterfeldkalibrierung zugewiesen und dem Rover eine 4G-Antennenmesskammerkalibrierung.
- iv. AMK4 vs AMK4: Bei dieser Kombination werden sowohl der Referenz als auch dem Rover 4G-Antennenmesskammerkalibrierungen zugewiesen.

Bei der kurzen Basislinie ist noch ein wichtiger Unterschied im Vergleich mit dem vorherigen Verfahren (Nullbasislinientest) im Bereich der Kalibrierungen zu erläutern:

Für die Trimble Antenne wurde nur jeweils eine Antennenmesskammerkalibrierung (AMK4) und eine Roboterfeldkalibrierung (RFK2) benutzt im Gegensatz zur Nullbasislinie, bei der jeweils zwei Trimble-Kalibrierungen eingesetzt wurden. Diese Trimble Kalibrierung ist nicht von der realen Antenne, die auf den Pfeilern positioniert war, sondern von einer anderen Trimble Antenne. Warum wurde aber eine Kalibrierung von einer anderen Antenne genutzt und nicht die der realen Antenne?

- ➔ Bei kurzen Basislinien sind die Höhenunterschiede generell sehr gering, besonders wenn die Länge der Basislinie nur 0,5m (Meter) beträgt wie im Fall dieser Untersuchung. Deswegen wurde die Kalibrierung einer anderen Antenne gewählt, um somit zu untersuchen, ob auch mittels dieser Kalibrierung die Höhenunterschiede gleich gering sind und das Endergebnis eine (fast) identische Genauigkeit aufweist.

Die folgende Tabelle (Tab. 5) beschreibt die Leica und die Trimble Kalibrierung, die bei der kurzen Basislinie eingesetzt wurden:

Antennentyp	Antennennummer	Datum der Kalibrierung	Art der Kalibrierung
Leica AR. 25 R.4 LEIT	726857	22.06.2018 (Roboter) 18.05.2018 (Messkammer)	individuell
Trimble Chokering SCIS 59.8000	5516356126	21.03.2018 (Roboter) 07.12.2017 (Messkammer)	individuell

Tab. 5: Auswertungsvarianten bei den kurzen Basislinien.

Vergleiche der Höhenunterschiede bei der L1-Lösung

Die L1-Lösung bei der kurzen Basislinie wurde in der WaSoft und in der Leica Infinity Software berechnet.

➤ Berechnung mit WaSoft:

Die Vorgehensweise im „wa2“ von WaSoft erfolgte wieder mittels einer Batchdatei. Die Befehlsoptionen pro Antenne waren acht (8) für die 24 Stunden Beobachtungsdateien der zwei Tagen. Somit ergeben sich sechzehn (16) unterschiedliche Befehlsmöglichkeiten. Die Ergebnisse werden im Unterkapitel 4.3 ausführlich analysiert.

Anbei wird ein Kommandozeilen-Beispiel zu den verschiedenen Kalibrierungsoptionen erläutert.

➔ Option AMK4 vs RFK2 für die Bestimmung des Südpfeilers: „**wa2 Nordpfeiler_19.02.19o Südpfeiler19.02.19o** +ACT3 +**AC1FLEIAR25.R4_LEIT_726857** _AMK4.atx +**AC2F TRM59800.00_SCIS_5516356126_RFK2.atx** +**TL1** +L2 +U32 -e10 +**FL_Sued_L1.txt**“

Bei diesem Beispiel vom 19.02.2019 befindet sich die Leica Antenne am Nordpfeiler und stellt die Referenz dar. Die Trimble Antenne befindet sich auf dem Südpfeiler und ist der Rover. Mit dem obigen Befehl wird die Position des Rovers bestimmt. Die Kalibrierung, die dem Rover zugewiesen wurde, ist eine 2G-Roboterfeldkalibrierung und die Referenz eine 4G- Antennenmesskammerkalibrierung. Diesem Beispiel ähneln auch die weiteren Kommandozeilen für die anderen Optionen.

➤ Berechnung mit Leica Infinity:

Bei Leica Infinity waren nur acht (8) unterschiedliche Kombinationen möglich statt sechszehn (16) wie bei WaSoft. Der Grund war, dass bei Leica Infinity die Mischung von unterschiedlichen Kalibrierungen nicht möglich ist. Somit fällt die Hälfte der Kombinationen weg.

Welche Kombinationen waren bei Infinity möglich?

- ➔ Wenn bei Referenz und Rover gleiche Kalibrierungen verwendet werden. Das bedeutet, entweder bei beiden eine 2G-Roboterfeldkalibrierung (RFK2 vs RFK2) oder beiden eine 4G-Antennenmesskammerkalibrierung (AMK4 vs AMK4) zugewiesen wird.

Höhenunterschied-vergleiche bei L5-Lösung

Die L5-Lösung bei der kurzen Basislinie wurde aus zeitlichen Gründen nur in der WaSoft berechnet. Die Vorgehensweise war die gleiche wie bei der L1-Lösung.

Die möglichen Kombinationen für die 24 Stunden Beobachtungsdateien der zwei Tage waren auch mit der L5-Lösung insgesamt sechszehn. Erwähnenswert ist, dass bei einer L5-Lösung die Beobachtungsdatei ca. 70% weniger Beobachtungen beinhaltet als bei der L1-Lösung. Damit wird untersucht, ob auch mit 70% weniger Beobachtungen das Ergebnis die gleiche (oder sehr ähnliche) Genauigkeit wie bei der L1-Lösung aufweist.

3.6.3 Lange Basislinie

Im Teil der Untersuchungen für die langen Basislinien wurde die Referenzstation von Pfaffenhofen ausgesucht als Anschluss an die Nord- und Südpfeiler am LDBV in München. Die Auswahl dieser Station hatte zwei ausschlaggebende Gründe:

- Der Abstand zwischen den zwei Pfeilern und der Referenzstation in Pfaffenhofen beträgt ca. 44km und dies entspricht den normalen Abständen zwischen Referenzstationen im SAPOS-Netz in Bayern.
- Die Referenzstation in Pfaffenhofen hat keinen zu großen NHN-Höhenunterschied zu den Pfeilern in München (ca. 80m NHN-Höhenunterschied). Dies verringert Einflüsse, welche die Höhengenaugkeit verschlechtern können.

Bei Basislinien über 15 km spielt außerdem die Ionosphäre und die Troposphäre eine wichtige Rolle bei der Berechnung von langen Basislinien. Somit wurde bei dieser Auswertung die Option der ionosphärenfreien Linearkombination mit Troposphärenschätzung angewendet. Die Kombination ist bekannt als L0+t bzw. L0t (oder auch als

L3). Diese L0t Kombination ist die Beste für die Simulation und Berechnung einer langen Basislinie unter Berücksichtigung atmosphärischer Einflüsse.

Bei einer langen Basislinie nahe 50km liegen die Erwartungen bezüglich der Lage- und Höhengenaugigkeit mittels einer L0t Auswertung bei bis 1cm in Lage und bis 3cm in Höhe.

Die Auswertungen gliedern sich in 2 Hauptteile auf:

- I. Der Vergleich der zwei Kalibrierverfahren (Antennenmesskammer und Roboterfeldkalibrierung) und deren Kombinationen.
- II. Der Höhenunterschieds-Vergleich der L0t-Lösung zwischen unterschiedlichen Satellitensystemen und Frequenzkombinationen:

Lage- und Höhenunterschiede mittels unterschiedlicher Kalibrierungen

In diesem Teil wurde sowohl mit der WaSoft als auch mit der Leica Infinity Software gearbeitet.

➤ Berechnung mit WaSoft:

Mittels WaSoft wurden alle vier möglichen Kombinationen von unterschiedlichen Kalibrierungen berechnet und verglichen. Die Kombinationen waren folgende:

- i. AMK4 vs RFK2: Die Kombination, bei der die Referenz (bzw. der Referenzstation in Pfaffenhofen) eine 4G-Antennenmesskammerkalibrierung zugewiesen bekommt und der Rover (bzw. der Nord- oder Südpfeiler in München) eine 2G-Roboterfeldkalibrierung.
- ii. RFK2 vs RFK2: Bei dieser Kombination werden sowohl der Referenz (bzw. der Referenzstation in Pfaffenhofen) als auch dem Rover 2G-Roboterfeldkalibrierungen zugewiesen.
- iii. RFK2 vs AMK4: Hier wird der Referenz eine 2G-Roboterfeldkalibrierung zugewiesen und dem Rover eine 4G-Antennenmesskammerkalibrierung.
- iv. AMK4 vs AMK4: Bei dieser Kombination werden sowohl der Referenz als auch dem Rover 4G-Antennenmesskammerkalibrierungen zugewiesen.

Insgesamt wurden drei (3) Kalibrierungssätze für die Auswertung eingesetzt. Die zwei davon waren die auf den Pfeilern positionierten Antennen, und ein Kalibriersatz von einer anderen Trimble Antenne bzw. einer anderen Antennennummer (5516356126). Die Antennen und die eingesetzten Kalibrierungen waren folgende:

- Trimble Chokering 59.8000 SCIS mit Antennennummer 4943353582
- Trimble Chokering 59.8000 SCIS mit Antennennummer 5516356126
- Leica AR.25 R.4 LEIT mit Antennennummer 726857

Nochmal zu erwähnen ist, dass die Antennenmesskammerkalibrierung der Trimble Antennen mit Antennennummer 4943353582 eine 3G-Kalibrierung (AMK3) ist.

Die Referenzstation von Pfaffenhofen besitzt eine Trimble Chokering 59.8000 SCIS Antenne mit der Antennennummer (4923353243). Diese Antenne wurde nur im Roboterfeld (im Jahr 2012) und nicht in der Antennenmesskammer kalibriert. Damit der Vergleich zwischen Roboterfeld und Antennenmesskammer möglich ist, wurden Kalibrierungen einer anderen Trimble Chokering 59.8000 SCIS Antenne benutzt, die sowohl in der Antennenmesskammer als auch im Roboterfeld kalibriert worden ist. Diese Kalibrierungen waren die von den zwei Trimble Antennen, die auch für die Pfeiler genutzt wurden (mit den Antennennummern 4943353582 und 5516356126).

Die Vorgehensweise im „wa2“ von WaSoft erfolgte mittels einer Batchdatei. Die Befehlsoptionen waren insgesamt vierzig (40).

➤ Berechnung mit Leica Infinity:

Bei Leica Infinity wurde nur mit zwei (2) Kombinationen gearbeitet, nachdem die Mischung unterschiedlicher Kalibrierungen nicht möglich ist:

- RFK2 vs RFK2: Bei Referenz (Referenzstation in Pfaffenhofen) und Rover (Nord- oder Südpfeiler in München) wurde die 2G-Roboterfeldkalibrierung zugewiesen
- AMK4 vs AMK4: Bei Referenz (Referenzstation in Pfaffenhofen) und Rover (Nord- oder Südpfeiler in München) wurde die 4G-Antennenmesskammerkalibrierung zugewiesen.

Zeitlich bedingt wurde bei den Berechnungen mit Leica Infinity nur mit den zwei realen Antennen der Pfeiler gearbeitet.

Lage- und Höhenunterschiede mittels unterschiedlicher Satellitensysteme

Die Unterteilung von unterschiedlichen Satellitensystemen wurde in drei (3) Blöcken ausgerechnet.

- Im ersten Block wurden die Ergebnisse von der normalen L0t-Lösung übernommen. Diese L0t-Lösung besteht aus einer ionosphärefreien Kombination von G1/R1/E1/B1 und G2/R2/E5a/B2 Frequenzen und der dazu berechneten Troposphäre.
- Im zweiten Block wurden die Beobachtungsdaten ohne die L2/R2/B2 Frequenzen eingesetzt. Dadurch haben wir die L0Et-Lösung (oder auch L5Et). Sie besteht aus einer ionosphärefreien Kombination von G1/R1/E1 und G5/R3/E5a Frequenzen und dazu die berechnete Troposphäre.

- Im dritten Block wurden die Beobachtungsdateien spezifisch ausgedünnt. Nach der Ausdünnung bestand die Datei nur noch aus Galileo Beobachtungen. Dadurch waren die Beobachtungen um mehr als 80% gekürzt. Die Anzahl der verfügbaren Galileo Satelliten an den zwei Aufzeichnungstagen (19.02. und 20.02) betrug sieben (7) mit der Leica AR. 25 Antenne und neun (9) mit der Trimble Chokering Antenne.

Die Kombinationen von Kalibrierungen waren auch hier gleich wie im oberen Unterkapitel mittels WaSoft und Leica Infinity bzw. vier (4) Kalibrierkombinationen mittels WaSoft und zwei (2) mittels Leica Infinity.

3.7 Höhenübertragung / Nivellement

Um eine weitere Überprüfung des Höhenunterschiedes zwischen den zwei Pfeilern zu ermöglichen wurde ein Nivellement durchgeführt. Das Nivellement zwischen der Referenzstation München und der zwei Pfeiler auf dem Dach des LDBV's wurde mittels eines analogen Nivelliergerätes durchgeführt. Als Bezugspunkt diente die Referenzstation München. Somit wurden insgesamt zwei volle Sätze mit Hin- und Rückblick gemessen.

Die ermittelten Höhenunterschiede des Nivellements wurden dann mit der Koordinatenberechnung der Höhe der Pfeiler mittels Wanninger Software und SAPOS Webshops verglichen und gemittelt. Somit wurde insgesamt mittels dreier (3) verschiedener Methoden die Höhe der Pfeiler berechnet, überprüft und gemittelt.

Um noch eine weitere Überprüfung durchzuführen, wurde mittels einer Wasserwaage und eines Meterstabs der Höhenunterschied zwischen den zwei Pfeilern gemessen.

4 Ergebnisse der Untersuchungen

4.1 Lage- und Höhenbestimmung der Pfeiler / Nivellement

In diesem Teil werden die Ergebnisse der Mittelbildungen der drei unterschiedlichen Berechnungsstrategien für die Lage- und Höhenkoordinaten der zwei Pfeiler aufgelistet.

Lage- und Höhenbestimmung mittels WaSoft

Wie schon im Unterkapitel 3.6. beschrieben wurden mittels zweier kurzer Basislinien zwischen der Referenzstation und der zwei Pfeiler berechnet, um die genauen Lage- und Höhenkoordinaten der Pfeiler zu ermitteln. Da die Beobachtungsdateien von beiden Tagen verwendet wurden, gab es hier schon die erste Mittelbildung. In folgender Tabelle (Tab. 6) werden die Mittelbildungen der beiden Beobachtungstage jeweils vom Nord- und Südpfeiler mittels des Moduls „wa2“ (von WaSoft) dargestellt:

Mittelbildung	Nordpfeiler		
	X bzw. E (m)	Y bzw. N (m)	Z bzw. h (m)
ETRS 89 (X,Y,Z)	4177481,2152	858761,2633	4727791,6243
UTM (ellip. Höhe)	32692675,0088	5335227,1225	579,9835
UTM (NHN-Höhe)	32692675,0088	5335227,1225	534,3515
Mittelbildung	Südpfeiler		
	X bzw. E (m)	Y bzw. N (m)	Z bzw. h (m)
ETRS 89 (X,Y,Z)	4177481,5739	858761,2358	4727791,3124
UTM (ellip. Höhe)	32692674,9254	5335226,6537	579,9820
UTM (NHN-Höhe)	32692674,9254	5335226,6537	534,3500

Tab. 6: Mittelbildung der Pfeilerkoordinaten mittels WaSoft.

Der direkte Höhenunterschied der zwei Pfeiler (Nordpfeiler - Südpfeiler) mittels WaSoft beträgt 1,5mm.

Lage- und Höhenbestimmung mittels SAPOS-Webshops

Die zweite Lage- und Höhenbestimmung wurde mittels des SAPOS-Webshops durchgeführt. Auch hier wurde eine Mittelbildung der beiden Messtagen durchgeführt.

Da der SAPOS-Webshop ausschließlich nur für den Vergleich der Lage und Höhenbestimmung eingesetzt werden seine Funktionen und Eigenschaften nicht im Detail erläutert.

Die Mittelbildung (mittels des SAPOS Webshops) ergab folgende Ergebnisse (Tab. 7):

Mittelbildung Nordpfeiler			
	X bzw. E (m)	Y bzw. N (m)	Z bzw. h (m)
ETRS 89 (X,Y,Z)	4177481,2146	856761,2636	4727791,6244
UTM (ellip. Höhe)	32692675,0093	5335227,1229	579,9833
UTM (NHN-Höhe)	32692675,0093	5335227,1229	534,3513
Mittelbildung Südpfeiler			
	X bzw. E (m)	Y bzw. N (m)	Z bzw. h (m)
ETRS 89 (X,Y,Z)	4177481,5732	856761,2357	4727791,3125
UTM (ellip. Höhe)	32692674,9256	5335226,6543	579,9816
UTM (NHN-Höhe)	32692674,9256	5335226,6543	534,3496

Tab. 7: Mittelbildung der Pfeilerkoordinaten mittels SAPOS-Webshop.

Der direkte Höhenunterschied der zwei Pfeiler (Nordpfeiler - Südpfeiler) mittels WaSoft beträgt 1,7mm.

Gesamt-Mittelbildung zwischen WaSoft und SAPOS-Webshop

In der unteren Tabelle (Tab. 8) wird das Ergebnis der Mittelbildung dargestellt und anschließend mit der Messung mittels Wasserwaage und Maßstabs verglichen.

Mittelbildung gesamt:			
Mittelbildung des Nordpfeilers			
	X bzw. E (m)	Y bzw. N (m)	Z bzw. h (m)
ETRS 89 (X,Y,Z)	4177481,2149	856761,2634	4727791,6244
UTM (ellip. Höhe)	32692675,0090	5335227,1227	579,9834
UTM (NHN-Höhe)	32692675,0090	5335227,1227	534,3514
Mittelbildung des Südpfeilers			
	X bzw. E (m)	Y bzw. N (m)	Z bzw. h (m)
ETRS 89 (X,Y,Z)	4177481,5735	856761,2357	4727791,3125
UTM (ellip. Höhe)	32692674,9255	5335226,6540	579,9818
UTM (NHN-Höhe)	32692674,9255	5335226,6540	534,3498

Tab. 8: Gesamtmittelbildung der Pfeilerkoordinaten

Ergebnisse:

- Der Höhenunterschied der zwei Pfeiler (Nordpfeiler - Südpfeiler) nach der gesamten Mittelbildung beträgt 1,6mm.
- Der Höhenunterschied der zwei Pfeiler (Nordpfeiler - Südpfeiler) mittels Wasserwage beträgt 1,2mm.

Dieser sehr geringe Unterschied von 0,4mm, der sich aus dem direkten Vergleich ergeben hat, ist im akzeptablen Bereich.

Als nächstes werden die Ergebnisse des Nivellements dargestellt und mit den obigen Ergebnissen verglichen.

Nivellement

Die Ergebnisse des Nivellements zwischen Referenzstation München und der zwei Pfeiler mittels analogen Nivelliergeräts wurden mithilfe eines Maßstabs abgelesen (Oberkante, Unterkante, Mitte). Als nächstes folgte die Berechnung der Mitte und Vergleich mit der abgelesenen Mitte.

Die erste Tabelle (Tabelle 9) zeigt uns die ΔH -Differenzen zwischen den gemessenen Stationen. Die zweite Tabelle (Tabelle 10) beinhaltet die Höhenkoordinaten der zwei Pfeiler mit der Berechnung des Nivellements und die Differenz ΔH .

Nivellement	25.03.2019				
Station	Oberkante	Unterkante	Mitte	Gemittelt	Differenz ΔH
	(m)	(m)	(m)	(m)	Δh [m]
Ref. München	0,0542	0,0842	0,0694	0,0691	
Nordpfeiler	0,3008	0,3214	0,3111	0,3111	0,2420
Ref. München	0,0529	0,0843	0,0687	0,0686	
Südpfeiler	0,2981	0,3181	0,3082	0,3081	0,2395

Tab. 9: ΔH -Differenzen zwischen Referenzstation München und Pfeiler.

	UTM (NHN-Höhe)	UTM (ellip. Höhe)	UTM (NHN-Höhe)	UTM (ellip. Höhe)	Differenz
	Nivelliert	Nivelliert	Mittel von Wa2 und Webshop		Nivellement vs Mittel
	h (m)	h (m)	h (m)	h (m)	Δh [m]
Nordpfeiler	579,9820	534,3500	579,9834	534,3514	-0,0014
Südpfeiler	579,9795	534,3475	579,9818	534,3498	-0,0023

Tab. 10: Höhenkoordinaten der Pfeiler und ΔH -Differenzen.

Das Gesamtergebnis zeigt einen ΔH -Unterschied von 1,4mm beim Nordpfeiler und 2,3mm beim Südpfeiler zwischen Nivellement und Berechnung mittels der Softwares.

➤ Quellen von Messungenauigkeiten

Bei der kurzen Basislinie, die mittels L1-Lösung berechnet wurde, können folgende Einflüsse einen sehr geringe Höhenungenauigkeit von 1mm bis 2mm erzeugt haben:

- Nahfeldeinflüsse
- Die Antennenkorrekturdaten der verwendeten Kalibrierungen

Bei dem Nivellement besteht die Möglichkeit einer Messungenauigkeit von ca. 1mm durch die Verwendung des Maßstabs.

Über die eventuellen Gründe der oben ermittelten ΔH -Unterschieden (1,4mm am Nordpfeiler und 2,3mm am Südpfeiler) kann nur spekuliert werden (d.h. wie der ΔH -Fehler verteilt wird). Anhand der sehr geringen Unterschiede aber kann trotzdem von einer hohen Genauigkeit in der Höhe gesprochen werden und die Ergebnisse als zufriedenstellend bewerten werden.

Die Koordinaten der gesamten Mittelbildungen von den zwei Pfeiler in Lage und Höhe wurden bei den weiteren Berechnungen der Basislinien als Ausgangskordinaten eingesetzt.

4.2 Nullbasislinientest

4.2.1 Vergleich der Höhendifferenzen zwischen unterschiedlichen Frequenzlösungen bei 10° Elevationsgrenze

Nachdem die Ergebnisse in Lage (X und Y) für jegliche Frequenzlösung mit 10° Elevation sich zwischen 0,0mm und 0,5mm bewegten, werden die Ergebnisse nicht ausführlich dargestellt, da der Nullbasistest keine wirklichen Lageunterschiede ergibt.

Bei den Höhenunterschieden mit 10° Elevation werden die Ergebnisse in 4 Tabellen unterteilt. Als Ausgangskordinaten werden die Ergebnisse der jeweiligen L1-Lösung verwendet und mit den Ergebnissen der anderen Frequenzlösung verglichen:

- Tabelle 11: Höhenunterschied zwischen L1 und L2 Lösung (L1 abgezogen L2).
- Tabelle 12: Höhenunterschied zwischen L1 und L5 Lösung (L1 abgezogen L5).
- Tabelle 13: Höhenunterschied zwischen L1 und L0t Lösung (L1 abgezogen L0t).
- Tabelle 14: Höhenunterschied zwischen L1 und L0Et Lösung (L1 abgezogen L0Et).

Für alle Lösungen wird eine Kombination von Kalibrierungen eingesetzt:

- Bei Leica: Referenz mit der Leica-AMK4 und Rover mit der Leica-RFK2 Kalibrierung bzw. Antennenmesskammer gegenüber Roboterfeld Kalibrierung.
- Bei Trimble (Antennennummer: 4943353582): Referenz mit der dazugehörigen Trimble-AMK3 und Rover mit der dazugehörigen Trimble-RFK2 Kalibrierung bzw. Antennenmesskammer gegenüber Roboterfeld Kalibrierung.
- Bei Trimble (andere Antennennummer: 5516355126): Referenz mit der dazugehörigen Trimble-AMK4 und Rover mit der dazugehörigen Trimble-RFK2 Kalibrierung bzw. Antennenmesskammer gegenüber Roboterfeld Kalibrierung.

Anbei folgen die Ergebnisse:

L2 – Lösung:

	L2 - Lösung		
Antenne	Leica	Trimble	Trimble
Individuelle Kalibrierung:	7268864	5516356126	4943353582
19.02.2019	Nordpfeiler	Südpfeiler	Südpfeiler
	Δh (m)	Δh (m)	Δh (m)
L1 - L2	0,0018	0,0012	0,0020
20.02.2019	Südpfeiler	Nordpfeiler	Nordpfeiler
	Δh (m)	Δh (m)	Δh (m)
L1 - L2	0,0017	0,0012	0,0020

Tab. 11: Höhenunterschiede zwischen L1 und L2 Lösung

Das Gesamtergebnis der L2-Lösung zeigt ein sehr stabiles Verhalten in der Höhe mit Werten zwischen 1,2mm bei der Trimble Antenne mit einer anderen Kalibrierung und 2,0mm bei der Trimble Antenne mit der dazugehörigen Kalibrierung.

L5 – Lösung:

L5 - Lösung			
Antenne:	Leica	Trimble	Trimble
Individuelle Kalibrierung:	726864	5516356126	4943353582
19.02.2019	Nordpfeiler	Südpfeiler	Südpfeiler
	Δh (m)	Δh (m)	Δh (m)
L1 - L5	0,0019	0,0018	0,0016
20.02.2019	Südpfeiler	Nordpfeiler	Nordpfeiler
	Δh (m)	Δh (m)	Δh (m)
L1 - L5	0,0017	0,0018	0,0016

Tab. 12: Höhenunterschiede zwischen L1 und L5 Lösung

Das Gesamtergebnis der L5-Lösung zeigt ein sehr ähnliches stabiles Verhalten in der Höhe wie bei der L2-Lösung. Die Werte lagen zwischen 1,6mm und 1,9mm.

L0t – Lösung:

L0t - Lösung			
Antenne:	Leica	Trimble	Trimble
Individuelle Kalibrierung:	726864	5516356126	4943353582
19.02.2019	Nordpfeiler	Südpfeiler	Südpfeiler
	Δh (m)	Δh (m)	Δh (m)
L1 - L0t	0,0052	-0,0112	-0,0033
20.02.2019	Südpfeiler	Nordpfeiler	Nordpfeiler
	Δh (m)	Δh (m)	Δh (m)
L1 - L0t	0,0053	-0,0109	-0,0037

Tab. 13: Höhenunterschiede zwischen L1 und L0t Lösung

Die Ergebnisse bei der L0t-Lösung (mit Troposphärenschtzung) zeigen variierende Höhendifferenzen je nach Antenne.

- I. Die Leica Antenne mit der dazugehörigen Kalibrierung liegt bei 5,2mm bis 5,3mm
- II. Die Trimble Antenne mit einer anderen Kalibrierung zeigt einen relativ großen Höhenunterschied bis zu 11,2mm.

III. Die Trimble Antenne mit der dazugehörigen individuellen Kalibrierung ergibt den geringsten Höhenunterschied bis zu 3,7mm von den drei Möglichkeiten.

Das Gesamtergebnis zeigt, dass mittels der dazugehörigen Kalibrierung die Trimble Antenne einen viel geringeren Höhenunterschied aufweist als mit einer anderen individuellen Kalibrierung.

Insgesamt haben die „realen“ verwendeten Kalibrierungen (Leica und Trimble) einen Höhenunterschied bis zu 5,3mm ergeben.

L0Et – Lösung:

L0Et - Lösung			
Antenne:	Leica	Trimble	Trimble
Individuelle Kalibrierung:	728884	5518358128	4943353582
19.02.2019	Nordpfeiler	Südpfeiler	Südpfeiler
	Δh (m)	Δh (m)	Δh (m)
L1 - L0Et	0,0059	-0,0096	-0,0042
20.02.2019	Südpfeiler	Nordpfeiler	Nordpfeiler
	Δh (m)	Δh (m)	Δh (m)
L1 - L0Et	0,0063	-0,0095	-0,0044

Tab. 14: Höhenunterschiede zwischen L1 und L0Et Lösung

Ähnlich wie bei der L0t-Lösung sind mittels L0Et-Lösung die Höhenunterschiede der „realen“ individuellen Kalibrierungen geringer.

Es handelt sich um eine minimale Verschlechterung der Höhenunterschiede der realen Kalibrierungen in Gegensatz zur L0t-Lösung von ca. 1mm sowohl bei der Leica als auch bei Trimble Antenne sichtbar. Die Trimble Antenne mit einer anderen Kalibrierung ist wiederum um fast 2mm besser als bei der L0t-Lösung.

➤ Resümee:

Nach der Darstellung von der vier Vergleichen ist erkenntlich, dass die ionosphärenfreien Linearkombinationen (L0t und L0Et) die größten Höhenunterschiede aufweisen.

Die L5 und die L0Et-Lösungen haben fast identische Ergebnisse zu den L2 und L0t-Lösungen gezeigt.

4.2.2 Vergleich von Höhendifferenzen bei Elevationen von 0° bis 20°

Die Ergebnisse in Lage (X und Y) für jegliche Frequenzlösung zwischen 0° und 20° Elevation liegen bei bis zu 0,8mm. Dies ist ein so geringer Wert, dass die Lageergebnisse nicht ausführlicher dargestellt werden müssen.

Bei den Höhenunterschieden zwischen 0° und 20° Elevation werden die Ergebnisse werden in vier (4) Frequenzlöskategorien unterteilt. Als Ausgangskordinaten werden die Ergebnisse der jeweiligen L1-Lösung herangezogen und mit den Ergebnissen der anderen Frequenzlösung verglichen. Die vier verglichenen Frequenzlösungen zu L1 sind die gleichen wie im Unterkapitel 4.2.1. bzw. L2, L5, L0t und L0Et.

Bei den Ergebnissen wird hauptsächlich auf die Vergleiche der L0t und L0Et Frequenzlösungen fokussiert, da bei diesen Lösungen sehr deutliche Höhenunterschiede sichtbar sind und ein anschauliches Gesamtbild dargestellt werden kann.

Für alle Lösungen wird die gleiche Kombination von Kalibrierungen eingesetzt wie im Unterkapitel 4.2.1:

- Bei Leica: Referenz mit der Leica-AMK4 und Rover mit der Leica-RFK2 Kalibrierung bzw. Antennenmesskammer gegenüber Roboterfeld Kalibrierung.
- Bei Trimble (Antennennummer: 4943353582): Referenz mit der dazugehörigen Trimble-AMK3 und Rover mit der dazugehörigen Trimble-RFK2 Kalibrierung bzw. Antennenmesskammer gegenüber Roboterfeld Kalibrierung.
- Bei Trimble (andere Antennennummer: 5516355126): Referenz mit der dazugehörigen Trimble-AMK4 und Rover mit der dazugehörigen Trimble-RFK2 Kalibrierung bzw. Antennenmesskammer gegenüber Roboterfeld Kalibrierung.

Die Ergebnisse sind folgende:

L2-Lösung:

Bei der L2-Lösung werden nur der kleinste und der größte Höhenunterschied (L1 abgezogen L2-Lösung) der jeweiligen Antenne geliefert.

- Bei der Leica AR.25 R.4 Antenne:
 - Der kleinste Höhenunterschied war bei Elevation 20° mit einem Wert von 0,7mm.
 - Der größte Höhenunterschied war bei Elevation 10° mit einem Wert von 1,9mm.

- Bei der Trimble Chokering 59.8000 SCIS Antenne mit Antennennummer 4943353582:
 - Der kleinste Höhenunterschied war bei Elevation 0° mit einem Wert von 1,4mm.
 - Der größte Höhenunterschied war bei Elevation $12,5^\circ$ mit einem Wert von 2,2mm.
- Bei der Trimble Chokering 59.8000 SCIS Antenne mit Antennennummer 5516355126:
 - Der kleinste Höhenunterschied war bei Elevation 0° mit einem Wert von 0,4mm.
 - Der größte Höhenunterschied war bei Elevation 20° mit einem Wert von 2,5mm.

Ergebnisse:

- i. Bei der Leica Antenne befindet sich der geringste Höhenunterschied (0,7mm) bei der Elevation von 20° in Gegensatz zu den beiden Trimble Antennen, bei denen sich der geringste Höhenunterschied (0,4mm) bei der Elevation von 0° befindet. Bei der Elevation von 0° werden alle aufgezeichneten Satellitensignale benutzt in Gegensatz zu der Elevation von 20° , bei der alle Satellitensignale von Satelliten, die unter 20° lagen, eliminiert werden.
- ii. Die Trimble Antenne mit der von einer anderen Antennennummer (5516355126) verwendeten Kalibrierung weist den größten Unterschied zwischen dem minimalen und dem maximalen Höhenunterschied (2,1mm) auf.
- iii. Insgesamt war der höchste Höhenunterschied 2,5mm und somit zeigen alle Ergebnisse von den L2-Lösungen der drei Antennen ein stabiles Verhalten bei der Mischung von Kalibrierungen.

L5-Lösung:

Bei der L5-Lösung werden ebenfalls nur der kleinste und der größte Höhenunterschied (L1 abgezogen L5-Lösung) der jeweiligen Antenne geliefert.

- Bei der Leica AR.25 R.4 Antenne:
 - Der kleinste Höhenunterschied war bei Elevation 20° mit einem Wert von 0,9mm.
 - Der größte Höhenunterschied war bei Elevation 10° mit einem Wert von 2,1mm.

- Bei der Trimble Chokering 59.8000 SCIS Antenne mit Antennennummer 4943353582:
 - Der kleinste Höhenunterschied war bei Elevation 0° mit einem Wert von 1,0mm.
 - Der größte Höhenunterschied war bei Elevation $12,5^\circ$ mit einem Wert von 1,8mm.
- Bei der Trimble Chokering 59.8000 SCIS Antenne mit Antennennummer 5516355126:
 - Der kleinste Höhenunterschied war bei Elevation 0° mit einem Wert von 1,0mm.
 - Der größte Höhenunterschied war bei Elevation 20° mit einem Wert von 2,9mm.

Ergebnisse:

- i. Ähnlich wie bei den Ergebnissen der L2-Lösungen ist auch hier bei der Leica Antenne der geringste Höhenunterschied (0,9mm) bei einer Elevation von 20° in Gegensatz zu den beiden Trimble Antennen, bei denen sich der geringste Höhenunterschied (1,0mm) bei der Elevation von 0° befindet.
- ii. Die Trimble Antenne mit der verwendeten Kalibrierung von einer anderen Antennennummer (5516355126) weist den größten Unterschied zwischen dem minimalen und dem maximalen Höhenunterschied (1,9mm) auf.
- iii. Insgesamt war der höchste Höhenunterschied 2,9mm und somit zeigen alle Ergebnisse von den L5-Lösungen der drei Antennen ein ähnliches stabiles Verhalten wie von den L2-Lösungen bei der Mischung von Kalibrierungen.

L0t-Lösung

In diesem Teil werden die Ergebnisse ausführlich in Tabellen dargestellt. Die vier (4) Tabellen beinhalten folgende Ergebnisse bzw. Vergleiche:

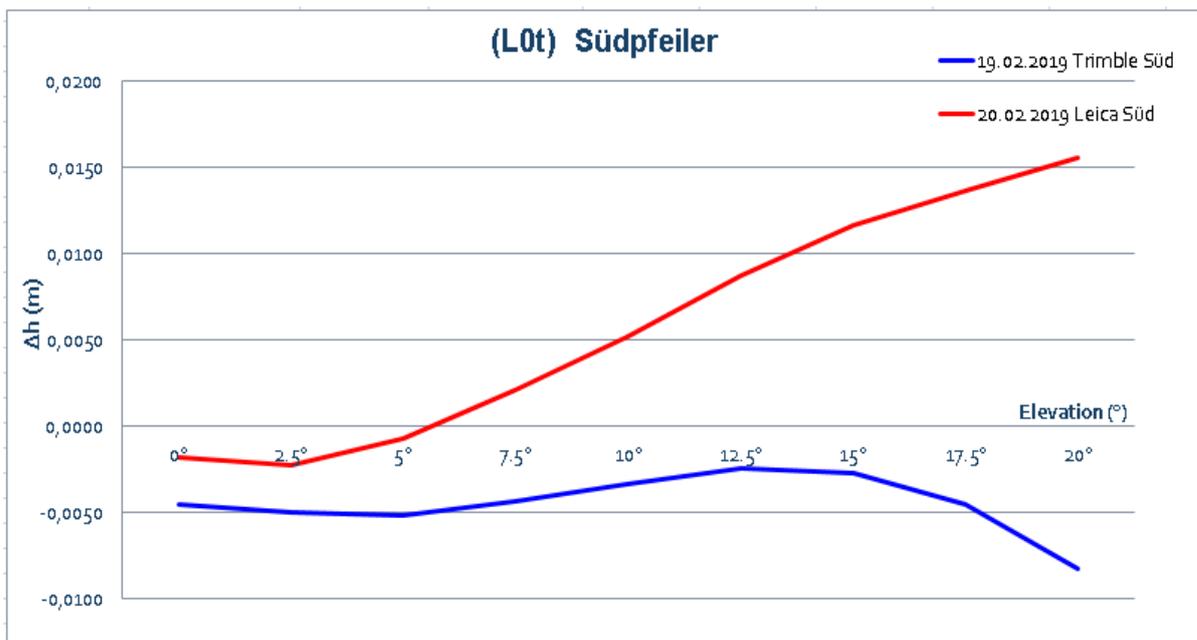
Bei den zwei (2) ersten Tabellen (Tab. 15 und 16) werden die Ergebnisse der Höhenunterschiede, die von der Mischung der AMK3 und RFK2 Kalibrierung erzeugt werden zwischen der Leica AR. 25 R.4 Antenne und der Trimble Chokering 59.8000 (mit Antennennummer 4943353582), dargestellt.

Bei den folgenden zwei Tabellen (Tab. 17 und 18) werden die Ergebnisse der Höhenunterschiede, die von der Mischung der AMK4 und RFK2 Kalibrierung erzeugt werden

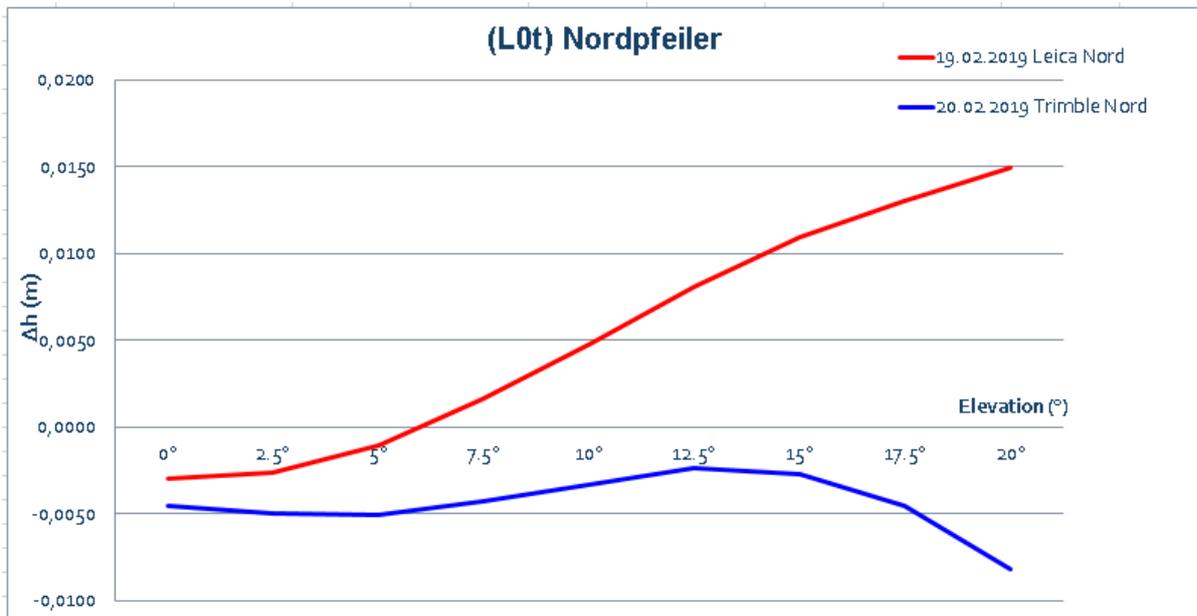
zwischen der Leica AR 25 R.4 Antenne und der Trimble Chokering 59.8000 (mit Antennenummer 5516355126), aufgezeigt.

Der wesentliche Unterschied befindet sich bei der Kalibrierung der zwei Trimble Antennenummern. Somit werden zuerst die reale Antenne und ihre Kalibrierung ausgewertet und danach die reale Antenne mit einer Kalibrierung einer anderen Antenne ausgewertet.

- Tabelle 15: Südpfeiler mit der Trimble Antenne (Antennenummer 4943353582) am 19.02.2019 und der Leica Antenne am 20.02.2019.
- Tabelle 16: Nordpfeiler mit der Leica Antenne am 19.02.2019 und der Trimble Antenne (Antennenummer 4943353582) am 20.02.2019
- Tabelle 17: Südpfeiler mit der Trimble Antenne (Antennenummer 5516355126) am 19.02.2019 und der Leica Antenne am 20.02.2019.
- Tabelle 18: Nordpfeiler mit der Leica Antenne am 19.02.2019 und der Trimble Antenne (Antennenummer 5516355126) am 20.02.2019.



Tab. 15: Höhenunterschiede (L0t) der Leica und Trimble (4943353582) Antenne am Südpfeiler.



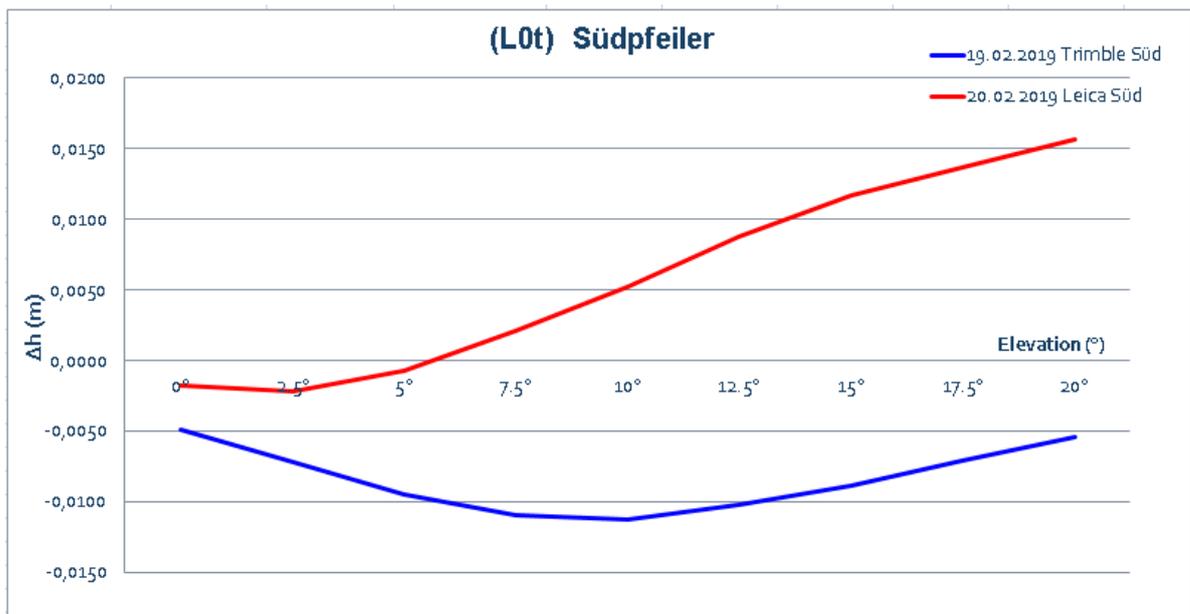
Tab. 16: Höhenunterschiede (L0t) der Leica und Trimble (4943353582) Antenne am Nordpfeiler.

Von den obigen Tabellen erhalten wir folgende Erkenntnisse:

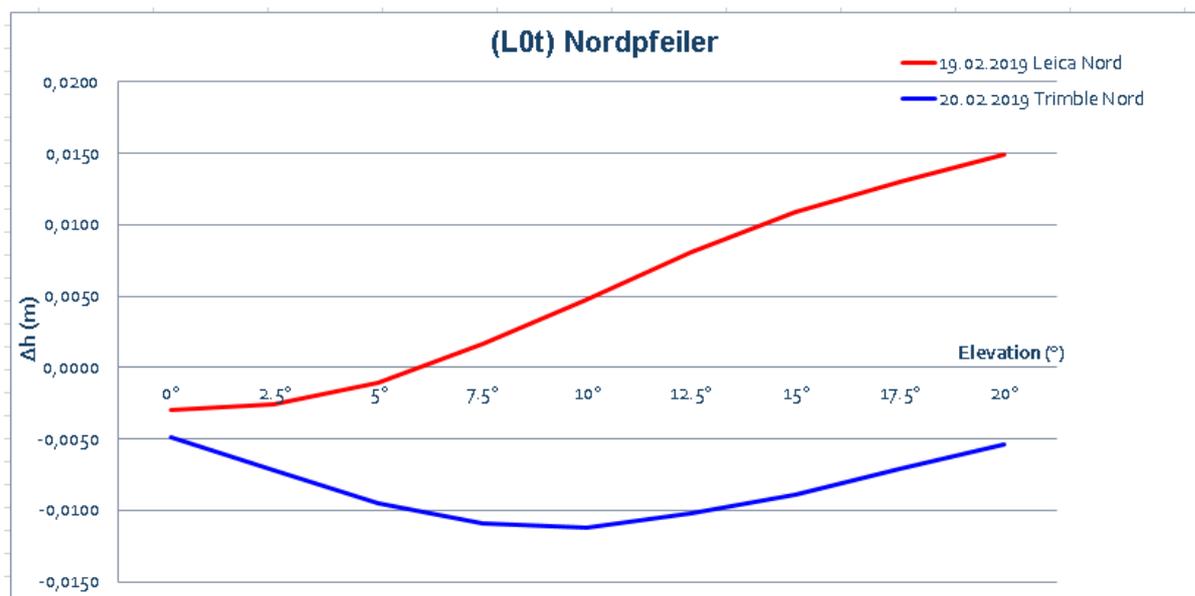
- I. Sowohl die Leica ($\Delta h = 15,6\text{mm}$) als auch die Trimble ($\Delta h = 9,3\text{ mm}$) Antenne liefern die größten Höhenunterschiede bei der Elevationsgrenze von 20° .
- II. Die Leica Antenne liefert die geringsten Höhenunterschiede bei Elevationsgrenzen von 0° bis $7,5^\circ$. Ab einer Elevationsgrenze von 10° werden die Höhenunterschiede immer größer.
- III. Die Trimble Antenne liefert sehr stabile Höhenunterschiede die nicht die $5,4\text{mm}$ überschreiten bis zu einer Elevationsgrenze von $17,5^\circ$. Die geringsten Höhenunterschiede werden bei einer Elevationsgrenze zwischen 10° und 15° geliefert.
- IV. Bei einer Elevationsgrenze von 10° (die Standard-Elevationsgrenze) weist die Leica Antenne Höhenunterschiede von $4,8\text{mm}$ bis zu $5,2\text{mm}$ und die Trimble Antenne Höhenunterschiede von $3,3\text{mm}$ bis zu $3,7\text{mm}$ auf.

Als nächstes folgen die Vergleiche der Höhenunterschiede zwischen der gleichen Leica Antenne mit der dazugehörigen Kalibrierung und der Trimble Antenne mit der eingesetzten Kalibrierung einer anderen Trimble Antenne (mit Nummer: 5516355126).

In Tabelle 17 und 18 werden diese Ergebnisse dargestellt:



Tab. 17: Höhenunterschiede (L0t) der Leica und Trimble (5516355126) Antenne am Südpfeiler.



Tab. 18: Höhenunterschiede (L0t) der Leica und Trimble (5516355126) Antenne am Nordpfeiler.

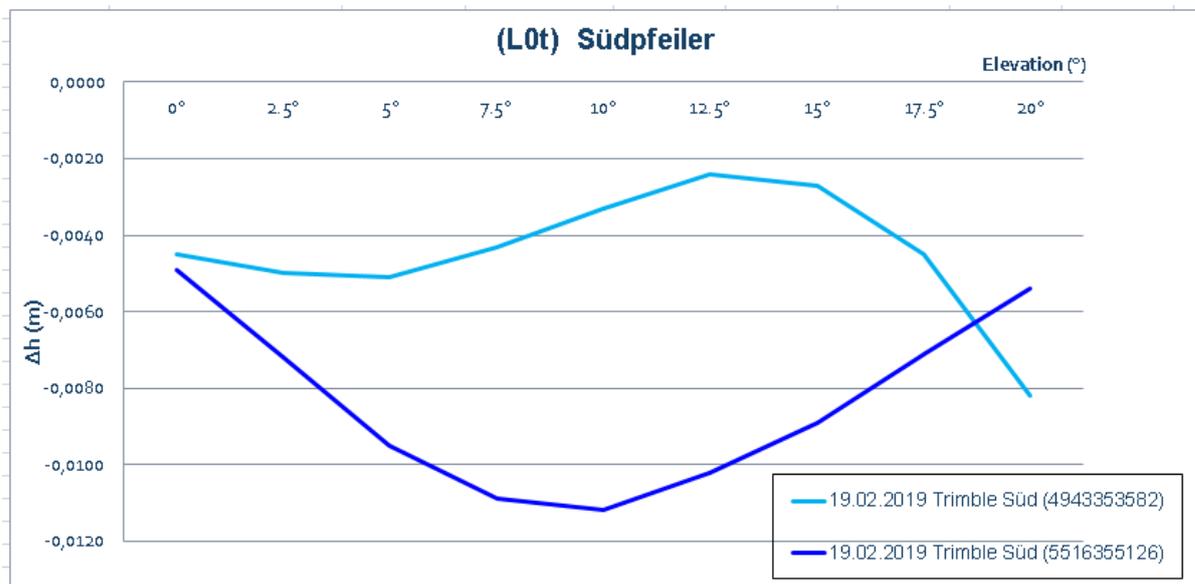
Aus den obigen Tabellen werden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- I. Die Trimble Antenne mit einer anderen eingesetzten Kalibrierung liefert verschiedenartige Höhenunterschiede in Gegensatz zur der gleichen Trimble Antenne mit der dazugehörigen Kalibrierung. Mittels der anderen Kalibrierung sind deutlich größere Höhenunterschiede zu erkennen.

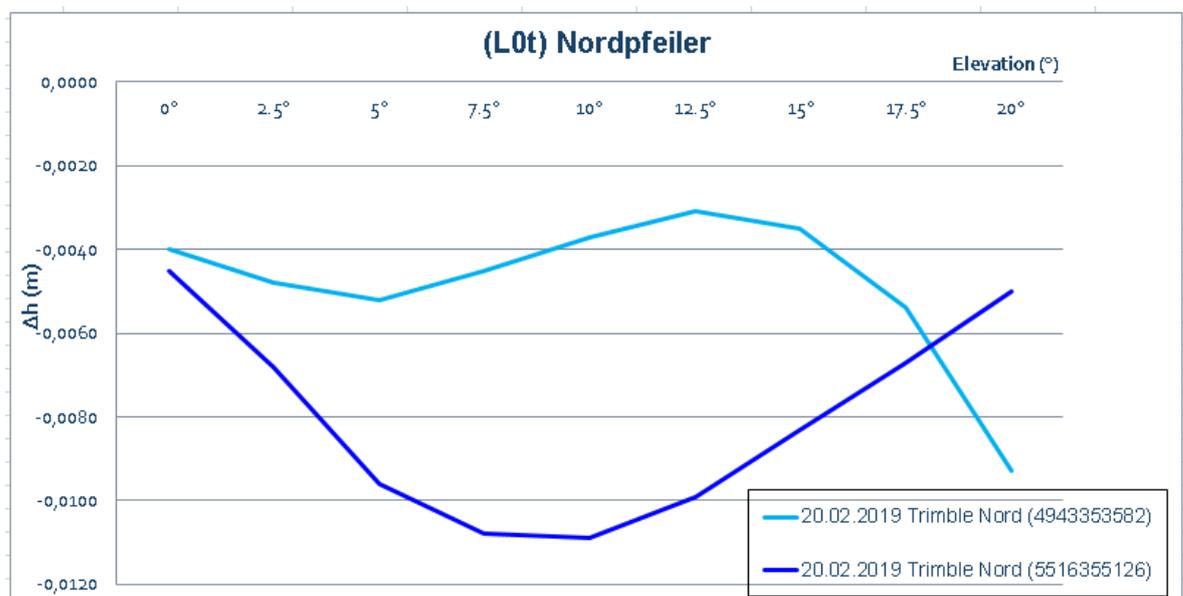
- II. Bei einer Elevationsgrenze von 10° (die Standard-Elevationsgrenze) weist die Leica Antenne Höhenunterschiede von 4,8mm bis zu 5,2mm und die Trimble Antenne Höhenunterschiede von 10,9mm bis zu 11,2mm auf.
- III. Die Trimble Antenne liefert die höchsten Höhenunterschiede bei einer Elevationsgrenze von 10°. Bei einer Elevation von 0° und 20° liefert sie die geringsten.

Um einen direkten Vergleich der Höhenunterschiede zwischen der Trimble Antenne mit der dazugehörigen Kalibrierung und mit einer anderen Kalibrierung zu schaffen werden zwei weitere Tabellen (Tab. 19 und 20) hinzugefügt.

Im Diagramm zeigt die hellblaue Linie die „reale“ Trimble Kalibrierung (4943353582) und die dunkelblaue Linie zeigt die Trimble Kalibrierung mit einer anderen Antennennummer (5516355126).



Tab. 19: Höhenunterschiede (L0t) der Trimble Kalibrierungen am Südpfeiler.



Tab. 20: Höhenunterschiede (L0t) der Trimble Kalibrierungen am Nordpfeiler.

Anhand der direkten Vergleiche der zwei verwendeten Trimble Kalibrierungen wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- I. Die Trimble Antenne mit ihrer dazugehörigen Kalibrierung (Antennennummer 4943353582) liefert kleinere Höhenunterschiede bei Elevationen zwischen 0° und 17.5° . Nur bei 20° Elevationsgrenze ist das Ergebnis umgekehrt.
- II. Die Trimble Antenne mit ihrer dazugehörigen Kalibrierung liefert sehr konsistente Ergebnisse, die zu einem nur geringen Höhenunterschied führen.

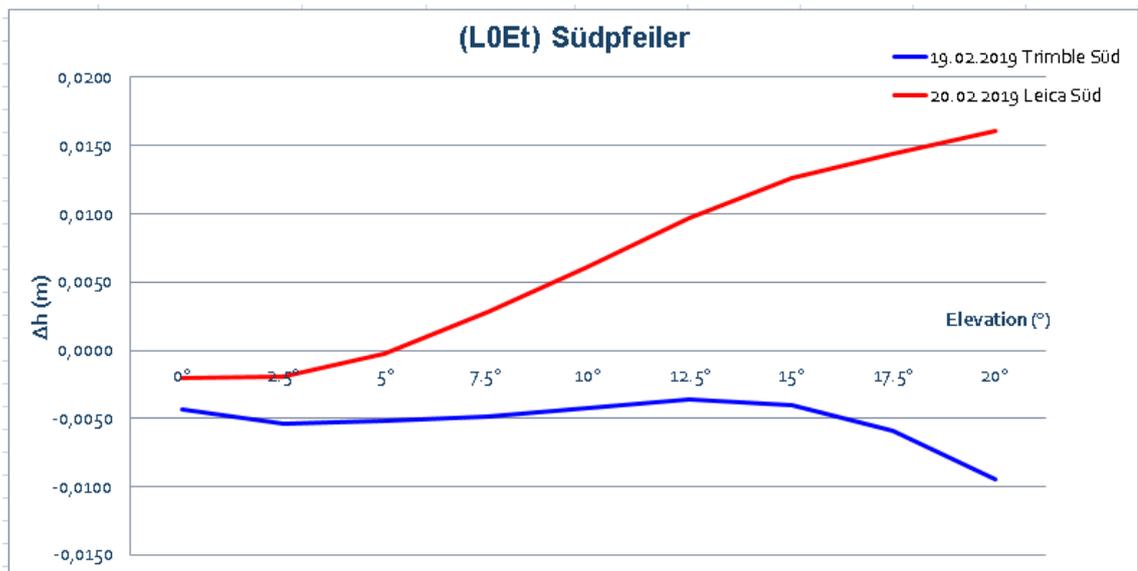
L0Et-Lösung

Im Teil der L0Et-Lösungen werden die Ergebnisse ausführlich in Tabellen dargestellt. Der Tabellenaufbau ist identisch mit den L0t-Lösungen.

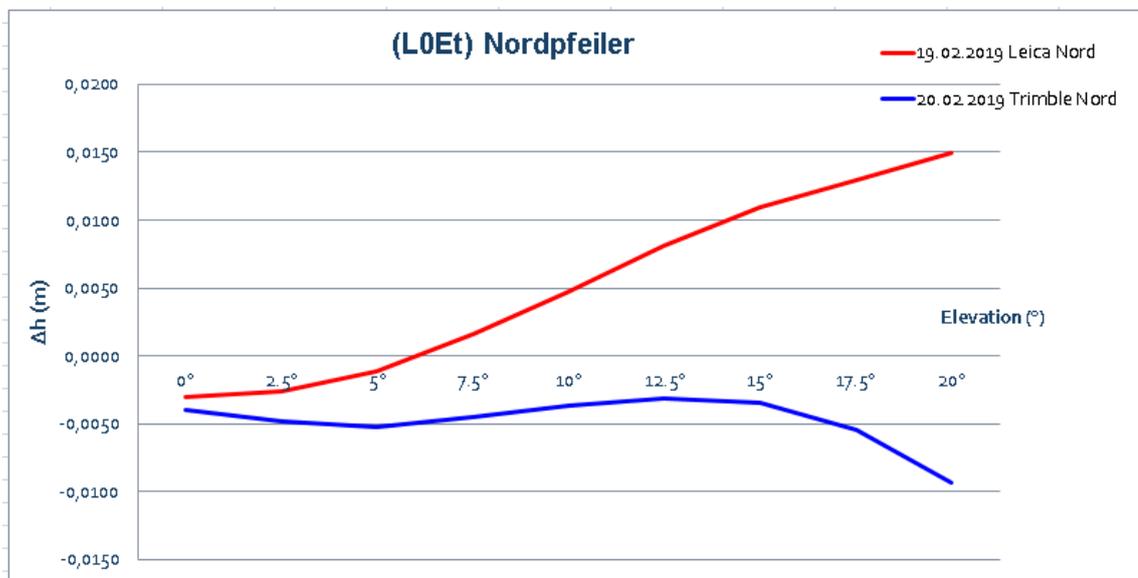
Bei den zwei (2) ersten Tabellen (Tab. 21 und 22) werden die Ergebnisse der Höhenunterschiede, die von der Mischung der AMK3 und RFK2 Kalibrierung erzeugt werden zwischen der Leica AR. 25 R.4 Antenne und der Trimble Chokering 59.8000 (mit Antennennummer 4943353582), dargestellt.

Bei den folgenden zwei Tabellen (Tab. 23 und 24) werden die Ergebnisse der Höhenunterschiede die von der Mischung der AMK4 und RFK2 Kalibrierung erzeugt werden zwischen der Leica AR 25 R.4 Antenne und der Trimble Chokering 59.8000 (mit Antennennummer 5516355126), aufgezeigt.

- Tabelle 21: Südpfeiler mit der Trimble Antenne (Antennennummer 4943353582) am 19.02.2019 und der Leica Antenne am 20.02.2019.
- Tabelle 22: Nordpfeiler mit der Leica Antenne am 19.02.2019 und der Trimble Antenne (Antennennummer 4943353582) am 20.02.2019
- Tabelle 23: Südpfeiler mit der Trimble Antenne (Antennennummer 5516355126) am 19.02.2019 und der Leica Antenne am 20.02.2019.
- Tabelle 24: Nordpfeiler mit der Leica Antenne am 19.02.2019 und der Trimble Antenne (Antennennummer 5516355126) am 20.02.2019.



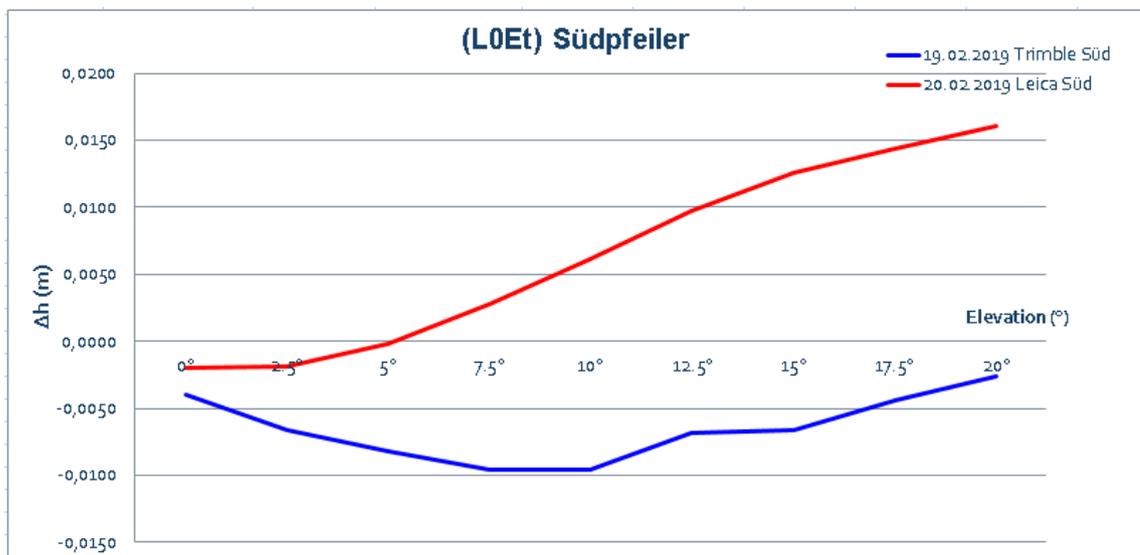
Tab. 21: Höhenunterschiede (L0Et) der Leica und Trimble (4943353582) Antenne am Südfeiler.



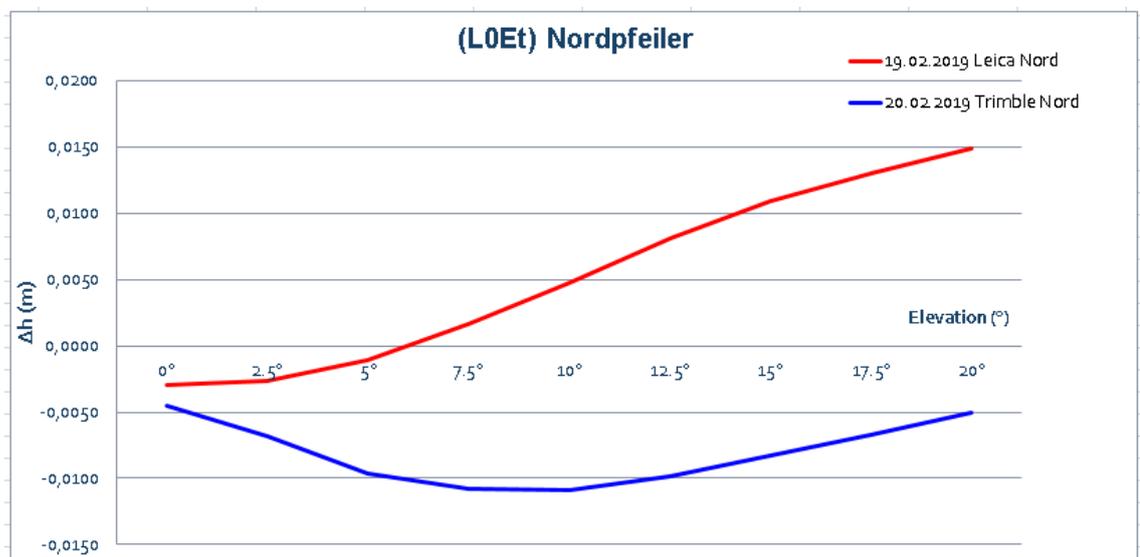
Tab. 22: Höhenunterschiede (L0Et) der Leica und Trimble (4943353582) Antenne am Nordfeiler.

Da die Ergebnisse der zwei Tabellen fast identisch mit den Höhenunterschieden der L0t-Lösungen (von Tabelle 15 und 16) sind, kann man auf die Erkenntnisse der L0t-Lösungen zugreifen.

Als nächstes folgen die Vergleiche der Höhenunterschiede zwischen der gleichen Leica Antenne mit der dazugehörigen Kalibrierung und der Trimble Antenne mit der eingesetzten Kalibrierung einer anderen Trimble Antenne (mit Nummer: 5516355126).



Tab. 23: Höhenunterschiede (L0Et) der Leica und Trimble (5516355126) Antenne am Südpfeiler.



Tab. 24: Höhenunterschiede (L0Et) der Leica und Trimble (5516355126) Antenne am Nordpfeiler.

Auch in diesem Fall sind die Ergebnisse der zwei Tabellen fast identisch mit den Höhenunterschieden der L0t-Lösungen (von Tabelle 17 und 18) und dadurch kann man auf die Erkenntnisse der L0t-Lösungen zugreifen.

Eine weitere direkte Gegenüberstellung der zwei Varianten von Trimble Kalibrierungen wird nicht aufgelistet, nachdem die Ergebnisse keine deutlichen Unterschiede zu den L0t-Lösungen aufweisen.

- Eine Gesamtbewertung der Ergebnisse der unterschiedlichen Elevationen ist in dem Unterkapitel 5.1. zu finden.

4.3 Kurzer Basislinientest

4.3.1 L1-Lösung Vergleiche

Bei dem Vergleich der L1-Lösungen wurde sowohl mittels WaSoft als auch der Leica Infinity Software ausgewertet. Die Ergebnisse von WaSoft werden zuerst dargestellt.

Die Soll-Koordinaten von der zwei Pfeiler, die für den Lage- und Höhenunterschied angewendet wurden, stammen von den Mittelbildungen im Unterkapitel 4.1.

- UTM-Soll-Koordinaten Südpfeiler (E, N, h) mit ellipsoidischer Höhe:

32692674,9255	5335226,6540	579,9818
---------------	--------------	----------

- UTM-Soll-Koordinaten Nordpfeiler (E, N, h) mit ellipsoidischer Höhe:

32692675,0090	5335227,1227	579,9834
---------------	--------------	----------

WaSoft Ergebnisse

Die L1-Ergebnisse der Leica und der Trimble Antenne (mit Antennennummer 5516355126) werden in den vier (4) Kalibrierkombinationen Unterteilt (Tab. 25 und 26):

Leica Beob.	Pfeiler Nord	19.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0020	-0,0009	-0,0002
RFK2 vs RFK2	-0,0015	-0,0011	-0,0003
RFK2 vs AMK4	-0,0014	-0,0013	0,0001
AMK4 vs AMK4	-0,0019	-0,0011	0,0002
Leica Beob.	Pfeiler Süd	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0014	0,0000	-0,0003
RFK2 vs RFK2	-0,0009	-0,0002	-0,0003
RFK2 vs AMK4	-0,0008	-0,0004	0,0001
AMK4 vs AMK4	-0,0013	-0,0003	0,0000

Tab. 25: Lage- und Höhenunterschiede (L1) der Leica Antenne.

Trimble Beob.	Pfeiler Süd	19.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0001	0,0003	0,0000
RFK2 vs RFK2	0,0000	0,0000	0,0004
RFK2 vs AMK4	0,0005	-0,0001	0,0003
AMK4 vs AMK4	0,0003	0,0001	-0,0001
Trimble Beob.	Pfeiler Nord	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0007	-0,0006	0,0001
RFK2 vs RFK2	-0,0006	-0,0009	0,0004
RFK2 vs AMK4	-0,0001	-0,0010	0,0004
AMK4 vs AMK4	-0,0002	-0,0008	0,0001

Tab. 26: Lage- und Höhenunterschiede (L1) der Trimble Antenne.

Die Ergebnisse der kurzen Basislinien liefern folgende Erkenntnisse:

- Die Höhenunterschiede sind sowohl bei der Leica als auch bei der Trimble Antenne unter 0,5mm und somit sehr gering.
- Die Lageunterschiede überschreiten insgesamt nicht die 2,0mm bei der Leica Antenne und bis 1,0mm bei der Trimble Antenne.
- Die Mischung von Kalibrierungen (AMK4 vs RFK2 und umgekehrt) bei der kurzen Basislinie mit einer L1-Lösung liefert ebenfalls hochgenaue Ergebnisse in Lage und Höhe.

Leica Infinity Ergebnisse

Die L1-Ergebnisse der Leica und der Trimble Antenne werden in den 2 Kalibrierkombinationen unterteilt (Tab. 27 und 28):

Leica Beob.	Pfeiler Nord	19.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
RFK2 vs RFK2	-0,0016	-0,0010	-0,0002
AMK4 vs AMK4	-0,0021	-0,0010	-0,0001
Leica Beob.	Pfeiler Süd	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
RFK2 vs RFK2	-0,0008	-0,0003	0,0000
AMK4 vs AMK4	-0,0013	-0,0003	0,0001

Tab. 27: Lage- und Höhenunterschiede (L1) der Leica Antenne.

Trimble Beob.	Pfeiler Süd	19.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
RFK2 vs RFK2	0,0001	-0,0001	0,0004
AMK4 vs AMK4	0,0006	-0,0001	0,0003
Trimble Beob.	Pfeiler Nord	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
RFK2 vs RFK2	-0,0007	-0,0008	0,0002
AMK4 vs AMK4	-0,0002	-0,0008	0,0001

Tab. 28: Lage- und Höhenunterschiede (L1) der Trimble Antenne.

Die Ergebnisse der kurzen Basislinien mittels Leica Infinity waren fast identisch mit denen von WaSoft. Zum direkten Vergleich folgt eine Tabelle (Tab. 29) des Vergleichs der Lage- und Höhenunterschiede mittels der zwei Softwares.

RFK2 vs RFK2	Wanninger vs Infinity		
	d ΔE (m)	d ΔN (m)	d Δh (m)
Leica 19.02	0,0001	-0,0001	-0,0001
Leica 20.02	-0,0001	0,0001	-0,0003
Trimble 19.02.	-0,0001	0,0001	0,0000
Trimble 20.02.	0,0001	-0,0001	0,0002
AMK4 vs AMK4	Wanninger vs Infinity		
	d ΔE (m)	d ΔN (m)	d Δh (m)
Leica 19.02	0,0002	-0,0001	0,0003
Leica 20.02	0,0000	0,0000	-0,0001
Trimble 19.02.	-0,0003	0,0002	-0,0004
Trimble 20.02.	0,0000	0,0000	-0,0001

Tab. 29: Vergleich der Lage- und Höhenunterschiede zwischen WaSoft und Infinity.

Aus dem direkten Vergleich der Lage- und Höhenunterschiede mittels der zwei Softwares ist ein fast identisches Ergebnis sichtbar.

4.3.2 L5-Lösung Vergleiche

Bei dem Vergleich der L5-Lösungen wurde ausschließlich mit WaSoft ausgewertet.

Die Soll-Koordinaten der zwei Pfeiler, die für den Lage- und Höhenunterschied angewendet wurden, stammen von den Mittelbildungen im Unterkapitel 4.1.

- UTM-Soll-Koordinaten Südpfeiler (E, N, h):

32692674,9255	5335226,6540	579,9818
---------------	--------------	----------

- UTM-Soll-Koordinaten Nordpfeiler (E, N, h):

32692675,0090	5335227,1227	579,9834
---------------	--------------	----------

Die L5-Ergebnisse der Leica und der Trimble Antenne werden in den 4 Kalibrierkombinationen unterteilt (Tab. 30):

Leica Beob.	Pfeiler Nord	19.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0018	-0,0010	-0,0003
RFK2 vs RFK2	-0,0014	-0,0012	0,0000
RFK2 vs AMK4	-0,0011	-0,0016	0,0013
AMK4 vs AMK4	-0,0015	-0,0014	0,0010
Leica Beob.	Pfeiler Süd	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0018	0,0006	-0,0007
RFK2 vs RFK2	-0,0015	0,0004	-0,0005
RFK2 vs AMK4	-0,0011	0,0001	0,0007
AMK4 vs AMK4	-0,0015	0,0003	0,0005
Trimble Beob.	Pfeiler Süd	19.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0004	0,0005	-0,0012
RFK2 vs RFK2	-0,0001	0,0002	0,0001
RFK2 vs AMK4	0,0003	0,0000	0,0003
AMK4 vs AMK4	0,0000	0,0003	-0,0010
Trimble Beob.	Pfeiler Nord	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0004	-0,0012	-0,0007
RFK2 vs RFK2	0,0000	-0,0014	0,0005
RFK2 vs AMK4	0,0003	-0,0016	0,0007
AMK4 vs AMK4	0,0000	-0,0014	-0,0005

Tab. 30: Lage- und Höhenunterschiede (L5) der Leica und Trimble Antenne.

Aus den Ergebnissen der kurzen Basislinien werden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Die Höhenunterschiede sind sowohl bei der Leica als auch bei der Trimble Antenne unter 1,3mm und somit sehr gering.
- Die Lageunterschiede überschreiten insgesamt nicht die 1,8mm bei der Leica Antenne und die 1,6mm bei der Trimble Antenne.
- Die Mischung von Kalibrierungen (AMK4 vs RFK2 und umgekehrt) bei der kurzen Basislinie mit einer L5-Lösung liefert ebenfalls hochgenaue Ergebnisse in Lage und Höhe.

Auch nachdem mittels der L5-Lösung insgesamt ca. 70% weniger Beobachtungen eingesetzt werden, zeigt sich trotzdem eine sehr hohe Genauigkeit bei den Lage- und Höhenunterschieden der kurzen Basislinie.

- Eine Gesamtbewertung der Ergebnisse der kurzen Basislinien ist in dem Unterkapitel 5.2. zu finden.

4.4 Langer Basislinientest

4.4.1 Lage und Höhenunterschiede bei unterschiedlichen Kalibrierungen

Bei dem Vergleich der L0t-Lösungen (mit Troposphärenschätzung und ionosphärenminimiert) wurde sowohl mittels WaSoft als auch mittels Leica Infinity Software ausgewertet. Die Ergebnisse von WaSoft werden zuerst dargestellt.

Die Soll-Koordinaten der zwei Pfeiler, die für die Lage- und Höhenunterschiede verwendet wurden, stammen von den Mittelbildungen im Unterkapitel 4.1.

- UTM-Soll-Koordinaten Südpfeiler (E, N, h) mit ellipsoidischer Höhe:

32692674,9255	5335226,6540	579,9818
---------------	--------------	----------

- UTM-Soll-Koordinaten Nordpfeiler (E, N, h) mit ellipsoidischer Höhe:

32692675,0090	5335227,1227	579,9834
---------------	--------------	----------

WaSoft Ergebnisse

Die lange Basislinie zwischen der Referenzstation in Pfaffenhofen und den zwei Pfeiler am Dach des LDBV's beträgt ca. 44km. In den folgenden Tabellen werden die Lage- und Höhenunterschiede der zwei Pfeiler in den vier (4) Kalibrierkombinationen dargestellt. Die Kalibriersätze waren die gleichen drei wie bei den vorigen Auswertungen:

- Tab. 31: Leica AR.25 R.4 LEIT mit Antennennummer 726857
- Tab. 32: Trimble Chokering 59.8000 SCIS mit Antennennummer 4943353582 („reale Antenne“)
- Tab. 33: Trimble Chokering 59.8000 SCIS mit Antennennummer 5516356126 (andere Antennennummer als die der Trimble Antenne auf dem Dach).

Leica Beob.	Pfeiler Nord	19.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0041	0,0003	-0,0122
RFK2 vs RFK2	-0,0033	-0,0005	-0,0070
RFK2 vs AMK4	-0,0032	-0,0005	-0,0176
AMK4 vs AMK4	-0,0040	0,0009	-0,0224
Leica Beob.	Pfeiler Süd	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0048	-0,0009	-0,0159
RFK2 vs RFK2	-0,0039	-0,0017	-0,0106
RFK2 vs AMK4	-0,0037	-0,0016	-0,0208
AMK4 vs AMK4	-0,0045	-0,0004	-0,0260

Tab. 31: Lage- und Höhenunterschiede (L0t) der Leica Antenne.

Trimble Beob.	Pfeiler Süd	19.02.2019	
Nr. 4943353582	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK3 vs RFK2	-0,0022	-0,0018	-0,0087
RFK2 vs RFK2	-0,0014	-0,0017	-0,0132
RFK2 vs AMK4	-0,0013	-0,0017	-0,0223
AMK3 vs AMK4	-0,0020	-0,0015	-0,0203
Trimble Beob.	Pfeiler Nord	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK3 vs RFK2	-0,0073	-0,0046	-0,0079
RFK2 vs RFK2	-0,0065	-0,0047	-0,0122
RFK2 vs AMK4	-0,0058	-0,0043	-0,0240
AMK3 vs AMK4	-0,0071	-0,0044	-0,0194

Tab. 32: Lage- und Höhenunterschiede (L0t) der Trimble Antenne (4943353582).

Trimble Beob.	Pfeiler Süd	19.02.2019	
Nr. 5516356126	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0020	-0,0007	-0,0001
RFK2 vs RFK2	-0,0019	-0,0007	-0,0103
RFK2 vs AMK4	-0,0018	-0,0006	-0,0194
AMK4 vs AMK4	-0,0019	-0,0007	-0,0103
Trimble Beob.	Pfeiler Nord	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0071	-0,0036	0,0009
RFK2 vs RFK2	-0,0069	-0,0035	-0,0093
RFK2 vs AMK4	-0,0062	-0,0032	-0,0211
AMK4 vs AMK4	-0,0069	-0,0035	-0,0093

Tab. 33: Lage- und Höhenunterschiede (L0t) der Trimble Antenne (5516356126).

Aus den Ergebnissen der Lage- und Höhenunterschiede werden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Der größte Lageunterschied bei beiden Trimble Kalibrierungen ist 7,1mm. Bei der Leica Kalibrierung ist er 4,8mm.
- Der größte Höhenunterschied bei der Trimble Antenne mit der dazugehörigen Kalibrierung ist 24,0mm und mit einer anderen Kalibrierung 21,1mm bei der Mischung von RFK2 vs AMK4. Bei der Leica Kalibrierung ist er 26,0mm bei einer AMK4 vs AMK4 Kalibrierkombination.

Bei einer langen Basislinie von 44km sind Lageunterschiede bis zu 10,0mm und Höhenunterschiede bis zu 30,0mm zu erwarten, da sehr viele Faktoren Einfluss nehmen.

Damit der direkte Vergleich der Kalibrierungskombinationen sichtbar und erkennbar wird, welches Kalibrierverfahren die niedrigsten Höhenunterschiede liefert, werden folgende Tabellen hinzugefügt.

- Tab. 34: Vergleich von Leica gegenüber Trimble Kalibrierung, wobei bei Trimble sowohl an den Pfeilern als auch in Pfaffenhofen die gleiche Kalibrierung eingesetzt wurde (Antennennummer: 4943353582).
- Tab. 35: Vergleich von Leica gegenüber Trimble Kalibrierung, wobei bei Trimble an den Pfeilern eine andere Kalibrierung als an der Referenzstation in Pfaffenhofen eingesetzt wurde (Trimble Antennennummer 5516356126 am Pfeiler und Trimble Antennennummer 4943353582 in Pfaffenhofen).

Pfeiler und Pfaffenhofen mit gleicher Antennennummer		
AMK4 vs RFK2	19.02.2019	20.02.2019
	Δh (m)	Δh (m)
Leica	-0,0122	-0,0159
Trimble	-0,0001	0,0009
$\delta\Delta h$ (m)	-0,0121	-0,0168
RFK2 vs RFK2	19.02.2019	20.02.2019
	Δh (m)	Δh (m)
Leica	-0,0070	-0,0106
Trimble	-0,0103	-0,0093
$\delta\Delta h$ (m)	0,0033	-0,0013
RFK2 vs AMK4	19.02.2019	20.02.2019
	Δh (m)	Δh (m)
Leica	-0,0176	-0,0208
Trimble	-0,0194	-0,0211
$\delta\Delta h$ (m)	0,0018	0,0003
AMK4 vs AMK4	19.02.2019	20.02.2019
	Δh (m)	Δh (m)
Leica	-0,0224	-0,0260
Trimble	-0,0103	-0,0093
$\delta\Delta h$ (m)	-0,0121	-0,0167

Tab. 34: Δh -Vergleiche der Kalibrierverfahren, Leica vs Trimble (mit Antennennummer 4943353582).

Pfeiler mit anderer Antennennummer		
AMK3 vs RFK2	19.02.2019	20.02.2019
	Δh (m)	Δh (m)
Leica	-0,0122	-0,0159
Trimble	-0,0087	-0,0079
$\delta\Delta h$ (m)	-0,0035	-0,0080
RFK2 vs RFK2	19.02.2019	20.02.2019
	Δh (m)	Δh (m)
Leica	-0,0070	-0,0108
Trimble	-0,0132	-0,0122
$\delta\Delta h$ (m)	0,0062	0,0016
RFK2 vs AMK4	19.02.2019	20.02.2019
	Δh (m)	Δh (m)
Leica	-0,0176	-0,0208
Trimble	-0,0223	-0,0240
$\delta\Delta h$ (m)	0,0047	0,0032
AMK3 vs AMK4	19.02.2019	20.02.2019
	Δh (m)	Δh (m)
Leica	-0,0224	-0,0260
Trimble	-0,0203	-0,0194
$\delta\Delta h$ (m)	-0,0021	-0,0066

Tab. 35: Δh -Vergleiche der Kalibrierverfahren, Leica vs Trimble
(mit Antennennummer 5516356126).

Aufgrund der direkten Vergleiche der Kalibrierkombinationen können folgende Aussagen getroffen werden:

- i. Insgesamt liefert die Roboter Kalibrierung (wenn sie bei den Pfeilern eingesetzt wird bzw. RFK2 vs RFK2 oder RFK2 vs AMK4) geringere Höhenunterschiede als die Antennenmesskammer Kalibrierung (wenn sie bei den Pfeilern eingesetzt wird bzw. AMK4 vs RFK2 oder AMK4 vs AMK4).

Die Roboter Kalibrierung liefert eine Differenz der Höhenunterschiede zwischen 0,3mm und 6,2mm.

Die Antennenmesskammer Kalibrierung wiederum zwischen 2,1mm und 16,8mm

- ii. Beim Einsatz der dazugehörigen Kalibrierung der Trimble Antenne (Tab. 35) werden die Differenzen der Höhenunterschiede von der Antennenmesskammer geringer.

Die Werte liegen zwischen 2,1mm und 8,0mm in Gegensatz zu Tabelle 34 bei der die Werte zwischen 12,1mm und 16,8mm liegen. Somit verbessern sie sich um fast 10,0mm aber die Höhendifferenzen sind trotzdem noch größer als von der Roboter Kalibrierung.

Leica Infinity Ergebnisse

Die L0t-Ergebnisse der Leica und der Trimble Antenne werden in den zwei (2) Kalibrierkombinationen unterteilt (Tab. 36). Die Kalibriersätze waren folgende:

- Leica AR.25 R.4 LEIT mit Antennennummer 726857
- Trimble Chokering 59.8000 SCIS mit Antennennummer 5516356126 (andere Antennennummer als die der Trimble Antenne die auf dem Dach war).

Leica Beob.	Pfeiler Nord	19.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
RFK2 vs RFK2	-0,0034	0,0021	-0,0068
AMK4 vs AMK4	-0,0043	0,0032	-0,0229
Leica Beob.	Pfeiler Süd	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
RFK2 vs RFK2	-0,0038	0,0001	-0,0066
AMK4 vs AMK4	-0,0048	0,0014	-0,0232
Trimble Beob.	Pfeiler Süd	19.02.2019	
Nr. 5516356126	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
RFK2 vs RFK2	-0,0041	0,0014	-0,0063
AMK4 vs AMK4	-0,0041	0,0014	-0,0063
Trimble Beob.	Pfeiler Nord	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
RFK2 vs RFK2	-0,0059	-0,0001	-0,0091
AMK4 vs AMK4	-0,0059	-0,0001	-0,0091

Tab. 36: Lage- und Höhenunterschiede (L0t) der Leica und Trimble Antenne.

Als nächstes folgt der direkte Vergleich der Kalibrierungskombinationen (Tab. 37):

AMK4 vs AMK4	19.02.2019	20.02.2019
	Δh (m)	Δh (m)
Leica	-0,0229	-0,0232
Trimble	-0,0063	-0,0091
$\delta\Delta h$ (m)	-0,0166	-0,0141
RFK2 vs RFK2	19.02.2019	20.02.2019
	Δh (m)	Δh (m)
Leica	-0,0068	-0,0066
Trimble	-0,0063	-0,0091
$\delta\Delta h$ (m)	-0,0005	0,0025

Tab. 37: Δh -Vergleiche der Kalibrierverfahren, Leica vs Trimble.

Aus den Ergebnissen der Lage- und Höhenunterschiede in Tabelle 36 werden folgende Erkenntnisse abgeleitet:

- Der größte Lageunterschied bei beiden Trimble Kalibrierungen ist 5,9mm. Bei der Leica Kalibrierung ist er 4,8mm.
- Der größte Höhenunterschied bei der Trimble Antenne mit einer anderen Kalibrierung ist 9,1mm. Bei der Leica Kalibrierung ist er 23,2mm.

Aus den direkten Vergleichen der Kalibrierkombinationen in Tabelle 37 ergibt sich die gleiche Aussage wie mittels WaSoft, d.h. die Roboter Kalibrierung (mit größter Differenz der Höhenunterschiede bei 2,5mm) hat eine viel geringere Höhendifferenzen als die Antennenmesskammer Kalibrierung (mit 16,6mm).

Vergleich WaSoft vs Leica Infinity

Nach der Auswertung der Lage- und Höhendifferenzen mittels beider Softwares werden die Ergebnisse in folgender Tabelle (Tab. 38) verglichen.

RFK2 vs RFK2	Wanninger vs Infinity		
L0t	$\delta\Delta E$ (m)	$\delta\Delta N$ (m)	$\delta\Delta h$ (m)
Leica 19.02	0,0001	-0,0026	-0,0002
Leica 20.02	-0,0001	-0,0018	-0,0040
Trimble 19.02.	0,0022	-0,0021	-0,0040
Trimble 20.02.	-0,0010	-0,0034	-0,0002
AMK4 vs AMK4	Wanninger vs Infinity		
L0t	$\delta\Delta E$ (m)	$\delta\Delta N$ (m)	$\delta\Delta h$ (m)
Leica 19.02	0,0003	-0,0023	0,0005
Leica 20.02	0,0003	-0,0018	-0,0028
Trimble 19.02.	0,0022	-0,0021	-0,0040
Trimble 20.02.	-0,0010	-0,0034	-0,0002

Tab. 38: Differenzen ($\Delta E, \Delta N, \Delta h$) zwischen WaSoft und Infinity.

Anhand der Ergebnisse ist kein großer Lage- und Höhenunterschied zwischen beiden Softwares erkennbar sowohl bei den Antennenmesskammer L0t-Lösungen als auch bei dem Roboter. In Lage besteht die größte Differenz bei 3,4mm und in Höhe bei 4,0mm.

4.4.2 Lage und Höhenunterschiede bei unterschiedlichen Satellitensystemen

Nachdem die L0t-Lösungen im Unterkapitel 4.4.1. ausführlich dargestellt wurden, erfolgt in diesem Teil die Vorlegung der L0Et-Lösungen (bzw. L5t-Lösungen) und der Galileo-Lösungen mit Troposphärenschätzung.

Auch hier werden die Ergebnisse mittels WaSoft und Leica Infinity unterteilt.

WaSoft Ergebnisse

In den folgenden Tabellen werden die Lage- und Höhenunterschiede der zwei Pfeiler in den vier (4) Kalibrierkombinationen dargestellt. Die Kalibriersätze sind folgende:

- Leica AR.25 R.4 LEIT mit Antennennummer 726857
- Trimble Chokering 59.8000 SCIS mit Antennennummer 5516356126 (andere Antennennummer als die der Trimble Antenne die auf dem Dach war).

➤ L0Et (L5t) Lösungen

Leica Beob.	Pfeiler Nord	19.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0037	-0,0021	-0,0137
RFK2 vs RFK2	-0,0030	-0,0031	-0,0074
RFK2 vs AMK4	-0,0028	-0,0032	-0,0159
AMK4 vs AMK4	-0,0035	0,0001	-0,0212
Leica Beob.	Pfeiler Süd	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0053	-0,0008	-0,0188
RFK2 vs RFK2	-0,0047	-0,0018	-0,0107
RFK2 vs AMK4	-0,0042	-0,0018	-0,0188
AMK4 vs AMK4	-0,0048	0,0015	-0,0238
Trimble Beob.	Pfeiler Süd	19.02.2019	
Nr. 5516356126	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0012	-0,0005	-0,0078
RFK2 vs RFK2	-0,0011	-0,0004	-0,0161
RFK2 vs AMK4	-0,0011	-0,0001	-0,0222
AMK4 vs AMK4	-0,0011	-0,0004	-0,0161
Trimble Beob.	Pfeiler Nord	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0137	-0,0058	0,0022
RFK2 vs RFK2	-0,0138	-0,0054	-0,0063
RFK2 vs AMK4	-0,0135	-0,0052	-0,0149
AMK4 vs AMK4	-0,0138	-0,0054	-0,0063

Tab. 39: Lage- und Höhenunterschiede (L0Et) der Leica und Trimble Antenne.

Bei der Trimble Beobachtung am 20.02 hatte die L0ET-Lösung Phasenmehrdeutigkeiten geliefert, die auf die Qualität der Lösung eine negative Auswirkung haben (Ambiguities 96,5%).

Die Ergebnisse der L0Et-Lösungen führen zu folgenden Erkenntnissen:

- i. Der größte Lageunterschied bei beiden Trimble Kalibrierungen ist 13,7mm mit einer Phasenmehrdeutigkeit. Ohne Phasenmehrdeutigkeiten liegt er bei 1,1mm. Bei der Leica Kalibrierung beträgt er 5,3mm.
- ii. Der größte Höhenunterschied bei der Trimble Antenne mit einer anderen Kalibrierung liegt bei 22,2mm bei der Mischung von RFK2 vs AMK4. Bei der Leica Kalibrierung ist er 23,8mm bei einer AMK4 vs AMK4 Kalibrierkombination.

Auch wenn bei der L0Et-Lösung die Beobachtungen um fast 70% weniger waren, hat kein Höhenunterschied die Grenze von 3,0cm überschritten.

In Lage, wenn die Lösung mit Phasenmehrdeutigkeiten vernachlässigt wird, sehen wir auch keinen Lageunterschied der die 1,0cm überschreitet.

➤ **Galileo -Lösungen**

Leica Beob.	Pfeiler Nord	19.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0038	-0,0020	-0,0138
RFK2 vs RFK2	-0,0029	-0,0030	-0,0067
RFK2 vs AMK4	-0,0027	-0,0030	-0,0153
AMK4 vs AMK4	-0,0036	0,0002	-0,0214
Leica Beob.	Pfeiler Süd	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0059	-0,0008	-0,0168
RFK2 vs RFK2	-0,0051	-0,0016	-0,0101
RFK2 vs AMK4	-0,0046	-0,0016	-0,0180
AMK4 vs AMK4	-0,0052	0,0014	-0,0243

Tab. 40: Lage- und Höhenunterschiede (Galileo) der Leica Antenne.

Trimble Beob.	Pfeiler Süd	19.02.2019	
Nr. 5516356126	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	0,0001	0,0001	-0,0091
RFK2 vs RFK2	0,0002	0,0002	-0,0176
RFK2 vs AMK4	0,0002	0,0005	-0,0230
AMK4 vs AMK4	0,0002	0,0002	-0,0176
Trimble Beob.	Pfeiler Nord	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
AMK4 vs RFK2	-0,0290	-0,0051	0,0123
RFK2 vs RFK2	-0,0289	-0,0049	0,0038
RFK2 vs AMK4	-0,0289	-0,0048	-0,0048
AMK4 vs AMK4	-0,0289	-0,0049	0,0038

Tab. 41: Lage- und Höhenunterschiede (Galileo) der Trimble Antenne.

Bei der Trimble Beobachtung am 20.02 hatte die Galileo-Lösung Phasenmehrdeutigkeiten geliefert, die auf die Qualität der Lösung eine negative Auswirkung haben (Ambiguities 88,8%). Diese Lösungen werden somit vernachlässigt.

Anhand der Ergebnisse der Galileo-Lösungen gewinnen wir folgende Erkenntnisse:

- i. Der größte Lageunterschied bei der Trimble Kalibrierung ist 0,5mm ohne Phasenmehrdeutigkeiten. Bei der Leica Kalibrierung ist er 5,2mm.
- ii. Der größte Höhenunterschied bei der Trimble Antenne mit einer anderen Kalibrierung liegt bei 23,0mm bei der Mischung von RFK2 vs AMK4.
Bei der Leica Kalibrierung beträgt er 24,3mm bei einer AMK4 vs AMK4 Kalibrierkombination.

Nachdem bei der Galileo-Lösung die Beobachtungen mehr als 80% weniger waren als die normale L0t-Lösung, können keine sicheren Aussagen getroffen werden, auch wenn die Ergebnisse ohne Phasenmehrdeutigkeiten bei dieser geringen Anzahl von Beobachtungen sehr zufriedenstellend waren.

Leica Infinity Ergebnisse

Die L0Et-Ergebnisse der Leica und der Trimble Antenne werden in den 2 Kalibrierkombinationen unterteilt (Tab. 42). Die Kalibriersätze waren folgende:

- Leica AR.25 R.4 LEIT mit Antennennummer 726857
- Trimble Chokering 59.8000 SCIS mit Antennennummer 5516356126 (andere Antennennummer als die der Trimble Antenne die auf dem Dach war).

➤ L0Et (L5t) Lösungen

Leica Beob.	Pfeiler Nord	19.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
RFK2 vs RFK2	-0,0022	-0,0013	-0,0076
AMK4 vs AMK4	-0,0028	0,0010	-0,0183
Leica Beob.	Pfeiler Süd	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
RFK2 vs RFK2	-0,0053	0,0006	-0,0142
AMK4 vs AMK4	-0,0053	0,0025	-0,0344
Trimble Beob.	Pfeiler Süd	19.02.2019	
Nr. 5516356126	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
RFK2 vs RFK2	-0,0040	0,0010	-0,0079
AMK4 vs AMK4	-0,0040	0,0010	-0,0079
Trimble Beob.	Pfeiler Nord	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
RFK2 vs RFK2	-0,0091	-0,0006	-0,0126
AMK4 vs AMK4	-0,0091	-0,0006	-0,0126

Tab. 42: Lage- und Höhenunterschiede (L0Et) der Leica und Trimble

In Gegensatz zu der Berechnung mittels WaSoft war die L0Et-Lösung der Trimble Beobachtung vom 20.02 ohne Phasenmehrdeutigkeiten.

Aus den Ergebnissen der L0Et-Lösungen können wir folgende Erkenntnisse ableiten:

- Der größte Lageunterschied bei beiden Trimble Kalibrierungen liegt bei 9,1mm. Bei der Leica Kalibrierung ist er 5,3mm.
- Der größte Höhenunterschied bei der Trimble Antenne mit einer anderen Kalibrierung liegt bei 12,6mm. Bei der Leica Kalibrierung ist er 34,4mm.

➤ **Galileo - Lösungen**

Leica Beob.	Pfeiler Nord	19.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
RFK2 vs RFK2	-0,0024	-0,0004	-0,0145
AMK4 vs AMK4	-0,0029	0,0004	-0,0325
Leica Beob.	Pfeiler Süd	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
RFK2 vs RFK2	-0,0065	0,0018	-0,0256
AMK4 vs AMK4	-0,0068	0,0042	-0,0387
Trimble Beob.	Pfeiler Süd	19.02.2019	
Nr. 5516356126	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
RFK2 vs RFK2	-0,0019	0,0005	-0,0126
AMK4 vs AMK4	-0,0019	0,0005	-0,0126
Trimble Beob.	Pfeiler Nord	20.02.2019	
	Soll- Ist	Soll- Ist	Soll- Ist
Kalibrierung	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
RFK2 vs RFK2	-0,0119	-0,0002	-0,0097
AMK4 vs AMK4	-0,0119	-0,0002	-0,0097

Tab. 43: Lage- und Höhenunterschiede (Galileo) der Leica und Trimble Antenne.

In Gegensatz zu der Berechnung mittels WaSoft war die Galileo-Lösung der Trimble Beobachtung vom 20.02 ohne Phasenmehrdeutigkeiten.

Die Ergebnisse der Galileo-Lösungen liefern folgende Erkenntnisse:

- i. Der größte Lageunterschied bei beiden Trimble Kalibrierungen liegt bei 11,9mm. Bei der Leica Kalibrierung ist er 6,8mm.
- ii. Der größte Höhenunterschied bei der Trimble Antenne mit einer anderen Kalibrierung liegt bei 12,6mm. Bei der Leica Kalibrierung ist er 38,7mm.

Nachdem bei der Galileo-Lösung die Beobachtungen mehr als 80% weniger waren als die normale L0t-Lösung, können keine sicheren Aussagen getroffen werden, auch wenn die Ergebnisse ohne Phasenmehrdeutigkeiten bei dieser geringen Anzahl von Beobachtungen sehr zufriedenstellend waren.

Vergleich WaSoft vs Leica Infinity

Nach der Auswertung der Lage- und Höhendifferenzen mittels beider Softwares werden die Ergebnisse in folgenden Tabellen (Tab. 38) verglichen.

➤ L0Et (L5t)

RFK2 vs RFK2	Wanninger vs Infinity		
L0Et (L5t)	$\delta\Delta E$ (m)	$\delta\Delta N$ (m)	$\delta\Delta h$ (m)
Leica 19.02	-0,0008	-0,0018	0,0002
Leica 20.02	0,0006	-0,0022	0,0035
Trimble 19.02.	0,0029	-0,0014	-0,0082
Trimble 20.02.	-0,0045	-0,0048	0,0062
AMK4 vs AMK4	Wanninger vs Infinity		
L0Et (L5t)	$\delta\Delta E$ (m)	$\delta\Delta N$ (m)	$\delta\Delta h$ (m)
Leica 19.02	-0,0007	-0,0009	-0,0029
Leica 20.02	0,0005	-0,0010	0,0106
Trimble 19.02.	0,0029	-0,0014	-0,0082
Trimble 20.02.	-0,0045	-0,0048	0,0062

Tab. 44: Differenzen ($\Delta E, \Delta N, \Delta h$) zwischen WaSoft und Infinity bei L0Et.

Anhand der Ergebnisse der L0Et (L5t) Lösungen sind Lagedifferenzen bis zu 4,8mm sichtbar. Die Höhendifferenz geht bis zu 10,6mm.

➤ Galileo

RFK2 vs RFK2	Wanninger vs Infinity		
Nur Galileo	$\delta\Delta E$ (m)	$\delta\Delta N$ (m)	$\delta\Delta h$ (m)
Leica 19.02	-0,0005	-0,0026	0,0078
Leica 20.02	0,0014	-0,0034	0,0155
Trimble 19.02.	0,0021	-0,0003	-0,0050
Trimble 20.02.	-0,0170	-0,0047	0,0135
AMK4 vs AMK4	Wanninger vs Infinity		
Nur Galileo	$\delta\Delta E$ (m)	$\delta\Delta N$ (m)	$\delta\Delta h$ (m)
Leica 19.02	-0,0007	-0,0002	0,0111
Leica 20.02	0,0016	-0,0028	0,0144
Trimble 19.02.	0,0021	-0,0003	-0,0050
Trimble 20.02.	-0,0170	-0,0047	0,0135

Tab. 45: Δh -Differenzen zwischen WaSoft und Infinity bei Galileo.

Nachdem der Vergleich der Trimble Beobachtung am 20.02. nicht berücksichtigt wird (wegen der Phasenmehrdeutigkeiten), wird nur zwischen den restlichen drei (3) Beobachtungen verglichen.

Anhand der Ergebnisse der Galileo Lösungen sind Lagedifferenzen bis zu 3,4mm sichtbar. Die Höhendifferenz geht bis zu 15,5mm.

Insgesamt waren die Höhe- und Lagedifferenzen zwischen der WaSoft und der Leica Infinity Auswertung eindeutig größer als bei L0t, aber aufgrund der wenigen Beobachtungen bei den L0Et und insbesondere bei den Galileo-Lösungen mit einer Basislinienlänge von 44km war das zu erwarten.

- Eine Gesamtbewertung der Ergebnisse der langen Basislinien ist in dem Unterkapitel 5.3. zu finden.
- Weitere Ergebnisse der langen Basislinie sind im digitalen Anhang zu finden.

5 Bewertung der Ergebnisse

Verschiedene Erkenntnisse der jeweiligen Basislinien wurden in Kapitel 4 erläutert. In diesem Teil werden die wichtigsten Erkenntnisse festgehalten, konkrete Aussagen getroffen und Spekulationen erwähnt.

5.1 Nullbasislinie

Im Nullbasislinienverfahren wurde erstens bewiesen, dass sämtliche Lage- und Höhenunterschiede, die bei den Tests ergaben, unabhängig von deren Beobachtungen (da identisch) sind, sondern nur von den eingesetzten Kalibrierungen abhängig sind.

Das Nullbasislinienverfahren hat gezeigt, dass Probleme bzw. Inkonsistenzen bei der Mischung der zwei Kalibrierungsverfahren vorhanden sind (Antennenmesskammer gegenüber Roboter). Diese signifikanten Abweichungen zeigten eine Höhendifferenz bis zu 3,7mm bei der Trimble Antenne und bis zu 5,2mm bei der Leica Antenne mittels der L0t-Lösung bei einer Elevationsgrenze von 10° .

Beim Einsatz einer anderen Kalibrierung bei der Trimble Antenne (andere Antennennummer) lag sogar der Höhenunterschied unter gleichen Bedingungen bei 11,2mm. Aufgrund dieser Ergebnisse muss bezweifelt werden, ob die Mischung von individuellen Kalibrierungen bei GNSS-Antennen sinnvoll ist. Somit können nach dem heutigen Stand sehr hohe Genauigkeiten in Lage und Höhe nur bei gleichen Kalibrierungen erreicht werden und von Kalibrier-Mischungen wird eher abgeraten, da diese hohen Genauigkeiten noch nicht erreicht werden können.

Des Weiteren wurde nach dem Einsatz von drei (3) individuellen Kalibrierungen (eine Leica und zwei Trimble) wurde ersichtlich, dass jede kalibrierte Antenne auch andere Lage- und Höhendifferenzen liefert und dadurch bestenfalls einzeln betrachtet werden sollte.

Bei unterschiedlichen Elevationsgrenzen wurde sichtbar, dass die niedrige Elevation die Höhe stabilisiert, was auch zu erwarten war. Anhand der Ergebnisse wird vermutet, dass baubedingt die jeweilige Antenne bei bestimmten Elevationen die niedrigste Höhendifferenz liefert (Leica bei 5° mit 0,7mm und Trimble bei $12,5^\circ$ mit 2,4mm).

In der Praxis wird normalerweise mit einer Elevationsgrenze zwischen 5° und 15° gearbeitet und es ist sehr interessant und erwähnenswert, dass sowohl die Trimble als auch

die Leica Antenne geringere Höhenunterschiede bei einer Elevation von 0° geliefert haben (Leica 1,8mm und Trimble 4,0mm) als bei anderen Elevationsgrenzen.

Die Leica Antenne lieferte geringere Höhenunterschiede bis zu einer Elevation von $7,5^\circ$ als die Trimble Antenne. Ab einer Elevation von 10° lieferte die Trimble Antenne geringere Höhenunterschiede. Dadurch wird nochmals das unterschiedliche Verhalten der Antennen bei unterschiedlichen Elevationsgrenzen mit gemischten Kalibrierungen sichtbar.

5.2 Kurze Basislinie

Im kurzen Basislinientest waren insgesamt alle Lage- und Höhenunterschiede sehr gering (Lage bis 2,0mm und Höhe bis 0,5mm). Es wird vermutet, dass der Lageunterschied durch Nahfeldeffekte und kalibrierungsabhängige Gründe entsteht, aber trotzdem sehr gering ist.

Es wurde erwartet, dass mittels der L1-Lösung (L1 ist auch die kürzeste Frequenz) die Ergebnisse hochgenau sind, was die Resultate bestätigten. Auch mittels der L5-Lösung (bei fast 70% weniger Beobachtungen) waren die Ergebnisse hochgenau und zeigten nur minimale Unterschiede (bis zu 1,0mm) im Vergleich zu der L1-Lösung.

Zu den Ergebnissen hat natürlich die Länge der Basislinie positiv beigetragen, die nur 0,4m betrug. Somit war der ellipsoidische Höhenunterschied zwischen den Pfeilern eigentlich 0,0m.

Da Leica Infinity die Möglichkeit bietet, kurze Basislinien hochpräzise und mit geringem Zeitaufwand auszuwerten, kann die Verwendung dieser Software dem Vermessungsingenieur empfohlen werden. Zu den Vorteilen zählen auch die benutzerfreundliche Oberfläche und die einfache graphische Bedienung der Software. Ein großer Nachteil von Leica Infinity ist nach wie vor, dass keine Mischung von Kalibrierungen möglich ist, was für wissenschaftliche Untersuchungen wenig hilfreich ist.

5.3 Lange Basislinie

Bei der langen Basislinie, die prinzipiell eine künstliche Anordnung ist, nachdem sie im Wesentlichen in der Landesvermessung und für das Referenzstationsnetz von SAPOS benötigt wird, waren merkliche Lage- und Höhenunterschiede festzustellen.

Der größte Höhenunterschied der L0t-Lösungen mittels einer Antennenmesskammerkalibrierung (AMK4 vs AMK4 bzw. AMK3 vs AMK4) war 26,0mm bei der Leica Anten-

ne und 20,3mm bei der Trimble Antenne mit ihrer dazugehörigen individuellen Kalibrierung. Diese maximalen Höhenunterschiede liegen trotzdem noch im annehmbaren Bereich des GPPS-Postprocessing, bei dem eine Genauigkeit von ca. 2cm erreicht werden sollte.

In Gegensatz zu der Antennenmesskammer haben die Roboterkalibrierungen (RFK2 vs RFK2) besser abgeschnitten, da sie einen maximalen Höhenunterschied von 10,6mm bei der Leica Antenne und 13,2mm bei der Trimble Antenne geliefert haben.

Im Δh -Vergleich zwischen Leica und Trimble Antenne war die Höhendifferenz der zwei Kalibrierverfahren auch deutlich geringer bei der Anwendung von Roboterkalibrierungen als bei der Anwendung von Kalibrierungen der Antennenmesskammer.

Bei der Trimble Antenne muss nochmals erwähnt werden, dass auch bei der langen Basislinie die Ergebnisse mit der dazugehörigen individuellen Kalibrierung geringere Lage- und Höhenunterschiede geliefert haben als mit einer anderen individuellen Kalibrierung.

Bei den L0Et-Lösungen bzw. L5t-Lösungen mittels WaSoft haben die Ergebnisse nur minimal größere Höhenunterschiede im Vergleich zu den L0t-Lösungen geliefert. Mit der Roboterkalibrierung war der maximale Höhenunterschied 16,0mm und mit der Antennenmesskammer 23,8mm.

Bei den Galileo-Lösungen kann das Ergebnis als instabil bezeichnet werden aufgrund der sehr wenigen Beobachtungen, die für die Berechnung einer Basislinie mit der Länge von 44km durchgeführt wurden.

Da viele Faktoren auf die Genauigkeit von Lage und Höhe negativ einwirken ist eine Gewichtung bzw. konkrete Zuordnung der Fehler nicht möglich. Die Auswahl von individuellen Kalibrierungen spielt aber eine sehr wichtige Rolle bei der Auswertung der Basislinien und kann die Genauigkeit der Höhe um sogar über 1cm verändern.

Die mit Leica Infinity ausgewerteten langen Basislinien waren nicht sehr zufriedenstellend, da nur wenige Kombinationen möglich waren. Die Mischung von Kalibrierungen ist auch gar nicht möglich. Die Ergebnisse lieferten eine minimal niedrigere Genauigkeit als mit WaSoft. Insgesamt kann die Aussage getroffen werden, dass die Leica Infinity Software nicht für den SAPOS-Positionierungsdienst geeignet ist und im Bereich der GNSS-Auswertungen nur bei kurzen Basislinien verwendet werden sollte.

Die WaSoft ist insgesamt eine sehr wissenschaftlich orientierte Software mit einer großen Vielfalt von Auswertungsstrategien und -möglichkeiten bei GNSS-Beobachtungen. Diese Charakteristika der Software haben eine ausschlaggebende Rolle in der vorliegenden Arbeit gespielt und viele erweiternde Berechnungen ermöglicht (v.a. bei der Nullbasislinie).

6 Fazit und Ausblick

Hauptziel der vorliegenden Arbeit war es, Untersuchungen mittels verschiedener Softwareprodukte durchzuführen, um den Einfluss der Antennenkalibrierungen auf die Genauigkeit der GNSS-Höhenbestimmung festzustellen (unter Berücksichtigung unterschiedlicher Mess- und Auswertestrategien).

GNSS-Systeme werden immer weiter aufgebaut und verbessert, ein Beispiel dafür ist das europäische Navigationssystem Galileo. Durch technisch fortgeschrittene und auch günstigere Empfänger stehen GNSS-Systeme jetzt schon vielen verschiedenen Anwendern zur Verfügung. Es werden auch weitere neue Nutzer und Anwendungsgebiete dazukommen.

Für die Vermessungsverwaltung ist der Ausbau von GNSS-Systemen ebenfalls sehr wichtig, da primäre Hauptaufgaben damit verknüpft sind. Im Geodätischen Grundnetz und dem Referenzstationsnetz des LDBV-Bayern liegen die höchsten Genauigkeitsanforderungen mittels GNSS-Beobachtungen in Lage und Höhe schon bei 1-2mm. Änderungen der eingesetzten geodätischen Antennen machen sich in systematischen Höheneffekten bemerkbar. Auch unterschiedliche Kalibrierverfahren können die Höhenergebnisse beeinflussen.

Die einzelnen Untersuchungen haben bedeutsame Ergebnisse geliefert und bieten wichtige Einblicke in die unterschiedlichen Kalibrierungsverfahren und deren Einflüsse.

Für den Großteil der SAPOS-Kunden stellen die berechneten Lage- und Höhenunterschiede kein Problem dar, da besonders die Echtzeit-Kunden (HEPS Dienst) weniger präzise Endergebnisse benötigen.

Für die Mitarbeiter von SAPOS sind die Ergebnisse dieser Bachelorarbeit hinsichtlich des Referenzstationsnetzes von großem Interesse. Sie werden zur Verbesserung der Genauigkeitsanforderungen in Lage und Höhe weiterverwendet.

Zu den Folgearbeiten dieser Arbeit werden weitere Untersuchungen anderer Antennen vorgeschlagen, da insgesamt nur zwei Antennen (mit drei individuellen Kalibrierungssätzen) untersucht worden sind. Nachdem bei der Trimble Antenne schon der Einsatz zwei unterschiedlicher Kalibrierungen zu abweichenden Ergebnissen führte (sowohl bei der Nullbasislinie als auch bei der langen Basislinie), bleibt zu erforschen, wie sich die übrigen Antennen bei unterschiedlichen Kalibrierungen in Bezug auf Lage- und Höhedifferenzen verhalten.

7 Literaturverzeichnis

Böder, V.; Menge, F.; Seeber, G.; Wübbena, G.; Schmitz, M.: *How to Deal with Station Dependent Errors – New Developments of the Absolute Field Calibration of PCV and Phase-Multipath with a precise Robot*, Salt Lake City, 2001.

http://www.geopp.de/pdf/ion2001-multipath_p.pdf (Aufgerufen am: 19.05.2019)

Breuer, B.; Campbell, J.; Görres, B.; Hawig, J.; Wohlleben, R.: *Kalibrierung von GPS-Antennen für hochgenaue geodätische Anwendungen*. SPN, S. 49–59, 1995.

Dilßner, F.; Seeber, G.: *Zum Einfluss nicht modellierter Antennenphasenfehler auf die präzise Positionsbestimmung*, Universität Bonn, 2006.

https://www.gib.uni-bonn.de/team/lehrbeauftragte/bgoerres/antennen-workshops/2006AWS/2006AWS_Dilssner.pdf (Aufgerufen am: 15.05.2019)

Dilßner, F.; Seeber, G.; Wübbena, G.; Schmitz, M.: *Impact of Near-Field Effects on the GNSS Position Solution*. International Technical Meeting, ION GNSS Savannah, Georgia, Sep 16–1, 2008.

DVW Merkblatt: *Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V.: Berücksichtigung von Antennenkorrekturen bei GNSS-Anwendungen 1/2011*.

https://www.dvw.de/sites/default/files/merkblatt/daten/2012/01_DVW-Merkblatt_Antennenkalibrierung_09_09_2011.pdf (Aufgerufen am: 16.05.2019)

DVW: *Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V.: GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft*. Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“. Beiträge zum 157. DVW-Seminar am 21. und 22. Februar 2017 in Potsdam. https://geodaesie.info/sites/default/files/privat/DVW_87_2017_GNSS_2017_FINAL_170206.pdf (Aufgerufen am: 14.05.2019)

Geiger, A.: *Einfluss und Bestimmung der Variabilität des Phasenzentrums von GPS-Antennen*. In: *Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der ETH Zürich, Mitteilungen Nr. 43*, Zürich, 1988.

Görres, B.: *Die GNSS-Empfangsantenne und ihre Wechselbeziehung mit der Stationsumgebung*. GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. Beiträge zum 157. DVW-Seminar am 22. Feb. 2017 in Potsdam. In: *DVW-SCHRIFTENREIHE S. 71-84, Band 87/2017*.

Görres, B.: *Ist das GNSS-Antennenproblem gelöst?* ZFV 4/2010. S. 256-267 https://geodaesie.info/system/files/privat/zfv_2010_4_Goerres.pdf (Aufgerufen am: 16.05.2019)

Görres, B.: *GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen. Beiträge zum 83. DVW Seminar am 18. und 19. März 2009 in Dresden. Aktueller Stand der GNSS Antennenkalibrierung. In: DVW-Schriftenreihe, Band: 57.*

[https://www.gib.uni-](https://www.gib.uni-bonn.de/team/lehrbeauftragte/bgoerres/papers/2009Dresden_Text.pdf)

[bonn.de/team/lehrbeauftragte/bgoerres/papers/2009Dresden_Text.pdf](https://www.gib.uni-bonn.de/team/lehrbeauftragte/bgoerres/papers/2009Dresden_Text.pdf)

(Aufgerufen am:21.05.2019)

IGS: *International GNSS Service: ANTEX format description, September 2017.*

<https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/216104678-ANTEX-format-description>

(Aufgerufen am: 20.05.2019)

LDBV-München: *Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung München.*

<https://www.ldbv.bayern.de/produkte/dienste/sapos.html> (aufgerufen am 19.05.2019)

Leick, A.: *GPS Satellite Surveying. 2. Aufl., John Wiley and Sons Inc., New York, 1995.*

Mansfeld, W.: *Satellitenordnung und Navigation. Grundlagen, Wirkungsweise und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme. 3. Auflage. Vieweg+Teubner. Wiesbaden, 2010.*

Mansfeld, W.: „*Satellitenortung und Navigation*“. 3. Überarb. U. aktual. Aufl., Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden 2010.

Schmitz, M.; Wübbena, G.; Propp, M.: *Absolute Robot-Based GNSS Antenna Calibration – Features and Findings (Vortragsfolien). International Symposium on GNSS, Space-based and Ground-based Augmentation Systems and Applications, Berlin, 2008. www.geopp.com/pdf/gpp_gnss08_antenna_f.pdf (Aufgerufen am:18.05.2019)*

Steigenberger, P.; Hauschild, A.; Montenbruck, O.; Hugentobler, U.: *Galileo, Compass und QZSS - Aktueller Stand der neuen Satellitennavigationssysteme, S.55. https://geodaesie.info/zfv/heftbeitrag/1114/zfv_2013_1_Steigenberger_et-al.pdf (Aufgerufen am:17.05.2019)*

Wanninger, L.: *WaSoft User's Guide, Volume 2, Juli 2018. http://www.wasoft.de/ (Aufgerufen am:23.05.2019)*

Wübbena, G.; Schmitz, M.; Wübbena, J: *GNSS Antenna Calibration–Current Status, Geo++, S. 6-7, 2017.*

http://skpos.gku.sk/eupos/files/12_gpp_status_antcal.pdf (Aufgerufen am:16.05.2019)

Wübbena, G.; Schmitz, M.; Boettcher, G.: *Near-field Effects on GNSS Sites: Analysis using Absolute Robot Calibrations and Procedures to Determine Corrections. Proceedings of the IGS Workshop 2006 Perspectives and Visions for 2010 and beyond, ESOC, Darmstadt, Germany, May 8–12, 2006.*

http://www.geopp.com/pdf/gppiigs06_pnf_g.pdf (Aufgerufen am:15.05.2019)

Wübbena, G.; Schmitz, M.; Menge, F.; Böder, V.; Seeber, G.: *Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in real-Time. S. 3. ION GPS 2000, September, Salt Lake City, USA, 2000.*

http://www.geopp.com/pdf/Ion2000_presented_at.pdf (Aufgerufen am:18.05.2019)

Zeimetz, P.: *Zur Entwicklung und Bewertung der absoluten GNSS-Antennenkalibrierung im HF-Labor. Institut für Geodäsie und Geoinformation. Schriftenreihe 21, 2010. <https://hss.ulb.uni-bonn.de/2010/2212/2212.pdf> (Aufgerufen am: 19.05.2019)*

Zeimetz, P.; Kuhlmann, H.: *Systematic effects in absolute chamber calibration of GPS antennas, In: Geomatica, 60/3, S. 267-274, Canadian Institute of Geomatics, 2006.*

Zeimetz, P.; Kuhlmann, H.: *On the Accuracy of Absolute GNSS Antenna Calibration and the Conception of a New Anechoic Chamber. Proceedings of the FIG Working Week, 14.-19. Juni 2008, Stockholm.*

www.gkgm.de/app/download/1375983/2008_zeimetz_kuhlmann.pdf

(Aufgerufen am: 13.05.2019)

Zogg, J.- M.: „GPS und GNSS: Grundlagen der Ortung und Navigation mit Satelliten“. [http://www.zogg-](http://www.zogg-jm.ch/Dateien/Update_Zogg_Deutsche_Version_Jan_09_Version_Z4x.pdf)

[jm.ch/Dateien/Update_Zogg_Deutsche_Version_Jan_09_Version_Z4x.pdf](http://www.zogg-jm.ch/Dateien/Update_Zogg_Deutsche_Version_Jan_09_Version_Z4x.pdf)

(Aufgerufen am:19.05.2019)

8 **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1: Geometrische Definition des Antennenphasenzentrums einer GPS Antenne.....	10
Abb. 2: Elevations- und azimutabhängige PCVs	10
Abb. 3: Antennenmodell für den Fall einer idealen Antenne	10
Abb. 4: Modell der richtungsabhängigen Phasenvariationen	11
Abb. 5: Kategorisierung der Kalibrierverfahren.....	13
Abb. 6: Geo++ Roboter mit Leica AR.25.R4 Antenne	15
Abb. 7: Geo++ Roboter mit TPSPN_A5 NONE Antenne	15
Abb. 8: Drei Roboter Testantennen bei Geo++ in Garbsen	15
Abb. 9: Prinzipskizze einer Antennenmesskammer.....	16
Abb. 10: Konzept der Antennenmesskammer in Bonn.....	17
Abb. 11: Einfluss der Signalstärke auf die gemessene Phase	18
Abb. 12: Gebräuchliche Verfahren zur Antennenkalibrierung	19
Abb. 13: Stationsabhängige Effekte, ihre Charakteristiken und Erfassungsmöglichkeiten	20
Abb. 14: Bild mit den Testantennen auf den Pfeilern und Referenzstation München	28
Abb. 15: Bild mit den Testantennen auf den Pfeilern am 20.02.2019	28
Abb. 16: Frequenzbereiche der verschiedenen Satellitennavigationssysteme	30
Abb. 17: Die Leica AR.25 Antenne aus unterschiedlichen Perspektiven	31
Abb. 18: Bilder einer Trimble Chokering ohne- und mit Radome	31
Abb. 19: Einzelschritte zur Analyse der Daten	35

9 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Teststationen und verwendete Referenzstationen	29
Tab. 2: Eckdaten der individuellen Antennenmesskammer Kalibrierungen	38
Tab. 3: Eckdaten der individuellen Roboter Kalibrierungen	39
Tab. 4: Auswertungsvarianten bei dem Nullbasislinientest.....	42
Tab. 5: Auswertungsvarianten bei dem kurzen Basislinien.....	45
Tab. 6: Mittelbildung der Pfeilerkoordinaten mittels WaSoft.....	50
Tab. 7: Mittelbildung der Pfeilerkoordinaten mittels SAPOS-Webshop.	51
Tab. 8: Gesamtmittelbildung der Pfeilerkoordinaten	51
Tab. 9: ΔH -Differenzen zwischen Referenzstation München und Pfeiler.....	52
Tab. 10: Höhenkoordinaten der Pfeiler und ΔH -Differenzen.....	52
Tab. 11: Höhenunterschiede zwischen L1 und L2 Lösung	54
Tab. 12: Höhenunterschiede zwischen L1 und L5 Lösung	55
Tab. 13: Höhenunterschiede zwischen L1 und L0t Lösung	55
Tab. 14: Höhenunterschiede zwischen L1 und L0Et Lösung	56
Tab. 15: Δh - (L0t) der Leica und Trimble (4943353582) Antenne am Südpfeiler	60
Tab. 16: Δh - (L0t) der Leica und Trimble (4943353582) Antenne am Nordpfeiler.....	61
Tab. 17: Δh - (L0t) der Leica und Trimble (5516355126) Antenne am Südpfeiler	62
Tab. 18: Δh - (L0t) der Leica und Trimble (5516355126) Antenne am Nordpfeiler.....	62
Tab. 19: Höhenunterschiede (L0t) am Südpfeiler der Trimble Kalibrierungen.....	63
Tab. 20: Höhenunterschiede (L0t) am Nordpfeiler der Trimble Kalibrierungen.....	63
Tab. 21: Δh - (L0Et) der Leica und Trimble (4943353582) Antenne am Südpfeiler	65
Tab. 22: Δh - (L0Et) der Leica und Trimble (4943353582) Antenne am Nordpfeiler.....	65
Tab. 23: Δh - (L0Et) der Leica und Trimble (5516355126) Antenne am Südpfeiler.....	66
Tab. 24: Δh - (L0Et) der Leica und Trimble (5516355126) Antenne am Nordpfeiler.....	66
Tab. 25: Lage- und Höhenunterschiede (L1) der Leica Antenne	67

Tab. 26: Lage- und Höhenunterschiede (L1) der Trimble Antenne	68
Tab. 27: Lage- und Höhenunterschiede (L1) der Trimble Antenne	68
Tab. 28: Lage- und Höhenunterschiede der Trimble Antenne	69
Tab. 29: Differenzen ($\Delta E, \Delta N, \Delta h$) zwischen WaSoft und Infinity	69
Tab. 30: Lage- und Höhenunterschiede (L5) der Leica und Trimble Antenne.	70
Tab. 31: Lage- und Höhenunterschiede (L0t) der Leica Antenne	72
Tab. 32: Lage- und Höhenunterschiede (L0t) der Trimble Antenne (4943353582)	73
Tab. 33: Lage- und Höhenunterschiede (L0t) der Trimble Antenne (5516356126).....	73
Tab. 34: Δh -Vergleiche der Kalibrierverfahren, Leica vs Trimble (mit Ant.nr: 4943353582). 74	
Tab. 35: Δh -Vergleiche der Kalibrierverfahren, Leica vs Trimble (mit Ant.nr: 5516356126). 75	
Tab. 36: Lage- und Höhenunterschiede (L0t) der Leica und Trimble Antenne	76
Tab. 37: Δh -Vergleiche der Kalibrierverfahren, Leica vs Trimble	76
Tab. 38: Differenzen ($\Delta E, \Delta N, \Delta h$) zwischen WaSoft und Infinity.....	77
Tab. 39: Lage- und Höhenunterschiede (L0Et) der Leica und Trimble Antenne	78
Tab. 40: Lage- und Höhenunterschiede (Galileo) der Leica Antenne	79
Tab. 41: Lage- und Höhenunterschiede (Galileo) der Trimble Antenne	80
Tab. 42: Lage- und Höhenunterschiede (L0Et) der Leica und Trimble Antenne	81
Tab. 43: Lage- und Höhenunterschiede (Galileo) der Leica und Trimble Antenne	82
Tab. 44: Differenzen ($\Delta E, \Delta N, \Delta h$) zwischen WaSoft und Infinity bei L0Et	83
Tab. 45: Differenzen ($\Delta E, \Delta N, \Delta h$) zwischen WaSoft und Infinity bei Galileo	83

10 Abkürzungsverzeichnis

AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen
AMK	Antennenmesskammer Kalibrierung
ANTEX	Antenna Exchange Format
ARP	Antennenreferenzpunkt
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System
DHHN	Deutsches Haupthöhennetz
DOP	Dilution of Precision
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ETRS89	European Terrestrial Reference System 89
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HEPS	Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service
IGG	Institut für Geodäsie und Geoinformation
IGS	International GNSS Service
LDBV	Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung
MP	Multipath
NHN	Normalhöhennull
NWA	Netzwerkanalysator
PCO	Phase Center Offset
PCV	Phase Center Variation
PZ	Phasenzentrum
RFK	Roboterfeld Kalibrierung
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung

TEC	Total Electron Content
UTM	Universal Transverse Mercator
VRS	Virtuelle Referenzstation
WaSoft	Wanninger Software
WGS84	World Geodetic System 1984
ZTD	Zenith Total Delay

11 Anhang / Inhaltsübersicht des USB-Sticks:

- Bachelorarbeit
 - Bachelorarbeit in Word- und PDF-Format
- Kolloquium
 - Präsentation in Power Point und in PDF-Format
- Erklärungen
 - Eidesstattliche Erklärung
 - Veröffentlichung von Daten im Internet
- Kurzfassung/Zusammenfassung
- Verwendete Daten
 - ANTEX-Files
 - Ephemeriden
 - RINEX-Daten
 - Leica Infinity
 - WaSoft (Batchdateien)
- Ergebnisse (Excel Tabellen)
 - Nivellement
 - Pfeilerkoordinaten
 - Nullbasislinie
 - Elevationen_Leica_AR25_Trimble_4943353582
 - Elevationen_Leica_AR25_Trimble_5516355126
 - Elevation_10°_Leica_Trimble
 - Kurze Basislinie
 - L1_WaSoft_und_Infinity
 - L5_WaSoft
 - Lange Basislinie
 - Alle_Frequenzen
 - L0t_L0Et_Galileo_Δh_Infinity
 - L0t_L0Et_Galileo_Δh_WaSoft
 - Δh_Vergleiche_kurze_vs_lange_Basislinie