

Roman Schiefer, Bakk. techn.

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades Diplom-Ingenieur
Masterstudium Geomatics Science



Technische Universität Graz

Betreuer:

Dr. André Nuckelt
Astrium Satellites

Begutachter:

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Kühtreiber
Institut für Navigation

Graz, Dezember 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	5
1.1	Herausforderung	5
1.2	Ziele	5
1.3	State of the Art	6
2	Grundlagen	8
2.1	Das ILT-System	8
2.1.1	Allgemein	8
2.1.2	Systemmodule und Architektur	8
2.1.3	Signaleigenschaften	13
2.2	NAVSTAR-GPS	15
2.2.1	Allgemein	15
2.2.2	Koordinatensysteme	16
2.2.3	Fehlereinflüsse	17
2.2.4	Basislinienberechnung	18
2.2.5	Ausblick	19
2.3	Statistische Verfahren	21
2.3.1	Grundlagen	21
2.3.2	Varianzfortpflanzung	24
2.3.3	Ausgleichsrechnung	25
2.3.4	Qualitätsbeurteilung	27
2.3.5	Lagerung	29
2.3.6	Gleitender Mittelwert Filter	31
2.4	Kalmanfilter	32
2.4.1	Kalmanfilter	32
2.5	Testareal und Referenzstationen	33
2.5.1	Testareale	33
2.5.2	Referenzstationen	34
3	Anforderung an die Transmitterpositionsgenauigkeit	36
3.1	Empirische Bestimmung der Genauigkeit der Streckenmessung	36
3.2	Ableitung der Genauigkeitsanforderungen der Transmitterpositionen	38
3.2.1	Simulationsrechnung	38
3.2.2	Geometrie	40
3.2.3	Ergebnisse	41
3.3	Empirische Überprüfung der Simulation	43
3.3.1	Statische Messung	43
3.3.2	Kinematische Messung	45

**Hochgenaue ad-hoc
Positionsbestimmung mit GNSS**

4	Positionierung der Sendestationen	48
4.1	Überblick	48
4.2	Neuer Ansatz zur Positionierung der Transmitter	49
4.2.1	Stand-alone Positionierung mittels GPS	49
4.2.2	Netzgeometrien bei der Basislinienberechnung	50
4.3	Reduzierung der Beobachtungszeit	53
4.4	Berechnungssoftware	55
5	Testmessungen	58
5.1	GNSS - Empfängertest	58
5.2	Testmessungen im Areal 23	61
5.2.1	Bestpos + Basislinien-Stern	63
5.2.2	Bestpos + Basislinien-Ring	64
5.2.3	Bestpos + Basislinien-Gesamtnetz	65
5.2.4	Hinzunahme von Symeo-Streckenmessungen	66
5.3	Testmessungen im Areal 5.1	67
5.3.1	Bestpos + Basislinien-Stern	69
5.3.2	Bestpos + Basislinien-Ring	70
5.3.3	Bestpos + Basislinien-Gesamtnetz	71
5.3.4	Hinzunahme von Symeo-Streckenmessungen	72
5.4	Testmessungen im Areal 24	73
5.5	Reduzierung der Beobachtungszeit	76
5.5.1	Testmessungen im Areal 23	76
5.5.2	Testmessungen im Areal 5.1	78
5.6	Hybridnetze	80
5.7	Fazit der Testmessungen	81
6	Alternative Positionierungsmethoden und Positionsalgorithmen	82
6.1	Transmitterpositionierung	82
6.1.1	WARTK und SBAS	82
6.1.2	Geoinformationssysteme	84
6.2	Empfängerpositionsalgorithmen	87
6.2.1	Grundlagen	87
6.3	NavWar - Szenarien	93
6.3.1	Jamming - Stören	94
6.3.2	Spoofing - Verfälschen	95
6.3.3	Robuste Empfänger	96
6.3.4	Gefahren für das ILT-System	97
7	Zusammenfassung, Fazit und Ausblick	98

Deutsche Fassung:
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date

.....
(signature)

Danksagung

Ich möchte mich hiermit bei meinen Betreuern André Nuckelt und Michael Burazanis bedanken, welche mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind. Weiters danke ich Dr. Norbert Kühtreiber für die Begutachtung und die wertvollen Tipps zu dieser Arbeit. Schlussendlich danke ich meinen Eltern, welche mir das Studium an der Technischen Universität Graz ermöglicht haben.

Danke

Kurzfassung

Die Firma Astrium GmbH hat ein Indoor-Navigations-System namens ILT (Indoor Localization Technology) entwickelt. Das System, welches in Form eines Demonstrators vorliegt, ist in der Lage mittels terrestrischer Radio-Navigation die Position eines Empfängers in Gebäuden zu bestimmen. Die Position wird durch Streckenmessungen zwischen mehreren Transmittern und einem Empfänger bestimmt. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der GPS-Positionsbestimmung der Transmitter und dessen Einfluss auf die Positionslösung des Empfängers. Dabei kommen Verfahren zu einer schnellen und genauen GPS-Positionsbestimmung, welche unabhängig von DGPS-Diensten (z.B. SAPOS oder APOS) arbeiten, zum Einsatz. Zur Unterstützung und Verbesserung der GPS-basierten Transmitterpositionierung wurden alternative Einmessverfahren implementiert und analysiert. Die Verfahren wurden in unterschiedlichen Arealen getestet und miteinander verglichen. Weiters beschreibt die Arbeit auch Alternativen zur absoluten GPS-Positionierung, welche auf Genauigkeit und Durchführbarkeit untersucht wurden. Unabhängig von der Transmitterpositionierung wurde ein Algorithmus zur Schätzung der Empfängerposition erweitert, wodurch dieser an Genauigkeit und Robustheit gewinnt. Durch die neuen Verfahren der Transmitter- und Empfängerpositionslösung lässt sich der Demonstrator, unter bestimmten Voraussetzungen, ohne DGPS-Dienste innerhalb der erforderlichen Genauigkeit betreiben.

Abstract

The company Astrium has developed an Indoor-Navigation-System named ILT (Indoor Localization Technology). The system demonstrator is capable to estimate the position of a receiver inside a building with the method of terrestrial radio navigation. The position is estimated by range measurements between the transmitters and the receiver. The thesis is focused on the GPS positioning of the transmitter stations and their correlation with the positioning accuracy of the receiver. The developed positioning methods should be fast and accurate without using any DGPS services as SAPOS or APOS. To support and improve the positioning of the transmitter stations an alternative range measurement has been implemented and analyzed. The new methods have been evaluated and compared in three different areas. Beside of the GPS positioning some alternative ways to position the transmitter have been discussed. Additionally the receiver positioning algorithm has been enhanced to achieve a higher accuracy and reliability. Through these new methods of transmitter and receiver positioning it is possible to operate the ILT-system within the accuracy requirements although no DGPS services are used.

Akronyme

AoA	Angle of Arrival
CDMA	Code Division Multiple Access
DR	Dead Reckoning
ETRF	European Terrestrial Reference Frame
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFT	Fast Fourier Transformation
GAJT	Novatel GADGET Receiver
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
ILT	Indoor Localization Technology
IMU	Inertial Measurement Unit
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
INS	Inertial Navigation System
LOS	Line of Sight
MAD	Median Average Deviation
MAV	Moving Average
MCS	Master Control Station
PC	Personal Computer
PPM	Parts per Milion
PRN	Pseudo Random Noise
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
RF	Radio Frequency
RFI	Radio Frequency Interference
RFID	Radio Frequency Identification
S/N	Signal to Noise
TC	Transmitterstation
TDoA	Time Difference of Arrival
ToA	Time of Arrival
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
UTC	Universal Time Coordinated
WGS84	World Geodetic System 1984
WLAN	Wireless Local Area Network

1 Einführung

In diesem Kapitel werden die Herausforderungen und Ziele der Diplomarbeit und des Indoornavigationssystem besprochen. Darüber hinaus werden alternative Systeme zu Positionierung und Gebäuden beschrieben.

1.1 Herausforderung

Das ILT-System (Indoor Localization Technology) ist ein Positionierungssystem, welches zur Positionierung von mobilen Empfängern in Gebäuden entwickelt wurde. Das System soll maßgeblich für sicherheitsrelevante Einsätze von Feuerwehr, Polizei und Militär eingesetzt werden. Wichtige Aspekte sind hierbei die Mobilität, die Genauigkeit und die schnelle Einsatzbereitschaft des Systems. Das ILT-System verwendet zur Positionsbestimmung koordinativ bekannte mobile Transmitterstationen. Der Fokus der Diplomarbeit gilt diesen Transmittern und deren Positionsbestimmung mittels GPS. Besondere Rücksicht muss dabei auf die zuvor Besprochenen wichtigen Aspekte genommen werden. Eine besondere Herausforderung ist der Prototypstatus und die Einmaligkeit des ILT-Systems.

Lösungen zu Problemen muss man sich vollständig selber erarbeiten, da wenig Literatur zu dieser Thematik vorliegt, sodass alle Entwicklungen einen praktischen Test zur Evaluierung benötigen. All diese Herausforderungen und das Arbeiten mit einem sehr experimentellen System macht dieses Projekt zu einer lohnenswerten und interessanten Arbeit.

1.2 Ziele

Die Ziele der Arbeit sind es Aussagen über die Positionierung der Transmitterstationen zu treffen. Dabei sollen folgende Fragestellungen bearbeitet werden:

1. Die erzielbare Empfängerpositionsgenauigkeit ist stark mit der Positionsgenauigkeit der einzelnen Transmitter und der gewählten Systemgeometrie korreliert. Diese Korrelationen sind theoretisch und experimentell zu untersuchen. Dies soll u.a. Aufschluss über die Genauigkeit der Streckenmessungen geben.
2. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse, sind die in den Tests ermittelten Sendesegmentgeometrien zu überprüfen und ggf. ist eine Anpassung durchzuführen.
3. Weiters ist ein Verfahren für eine schnelle, möglichst vollautomatische, GPS-basierte Einmessung der Sendestation zu konzipieren. Dieses Verfahren soll die notwendige Positionsgenauigkeit der Sendestationen ohne zusätzliche Korrekturdienste wie z.B. SAPOS, APOS oder ASCOS liefern können.
4. Zusätzlich sollen GPS-Empfänger aus unterschiedlichen Preisklassen auf ihre absolute Genauigkeit untersucht und deren mögliche Implementation zum aktuellen System analysiert werden.

5. Zur etwaigen Unterstützung und Verbesserung der GPS-basierten Senderpositionierung sind alternative Einmessverfahren für die Transmitter und Implementierungskonzepte zu recherchieren.
6. Auch die Alternativen zur absoluten GPS-Positionierung sollen auf Genauigkeit und einfache Durchführbarkeit untersucht werden.

Zusätzlich sollen robuste Schätzverfahren für die Empfängerpositionslösung auf Genauigkeit und Schnelligkeit untersucht werden. Dabei sollen auch dynamische Modelle anhand eines Kalmanfilters implementiert werden.

1.3 State of the Art

Bei der Indoor-Navigation handelt es sich um eine experimentelle Sparte der Navigation und Positionierung. Es gibt viele Studien und verschiedene Ansätze jedoch noch kein kommerzielles funktionierendes System. Aus diesem Grund ist auch die Forschungsmotivation in dieser Sparte sehr hoch, da es einen erheblichen Bedarf an Indoor-Lösungen gibt. Die unterschiedlichen Ansätze unterscheiden sich jedoch stark in Genauigkeit, Art der Positionierung und Komplexität. Folgend ein paar Beispiele für Indoor-Positionierungsmethoden.

- **Funk- und Pseudolit-Systeme:** Ein Pseudolit ist ein terrestrischer Transmitter, welcher Kopien von Satellitensignalen (meistens GPS bzw. Galileo) erstellt. Durch die Transmitterposition auf der Erde und der höheren Energiezugänglichkeit erreicht ein Pseudolit eine höhere Sendeleistung als ein Satellit. Kategorisieren kann man den Pseudolit in die Gruppe der terrestrischen Funkssysteme. Deren Vorteil ist, dass zur Positionierung keinerlei Infrastruktur in Gebäuden benötigt wird und die Systeme ein großflächiges Gebiet abdecken können. Die Größe dieses Gebiets und die Positionsgenauigkeit des Systems ist abhängig von der Sendeleistung und der Art des verwendeten Signals. Nachteile sind die regulatorischen Bestimmungen und die Empfindlichkeit gegen Störquellen. Das in dieser Arbeit bearbeitete ILT-System fällt in diese Gruppe der Funkssysteme.
- **WLAN-Systeme:** Da WLAN heutzutage in fast jedem Gebäude zu finden ist, ist es durchaus naheliegend die Übertragungssignale zur Positionierung zu verwenden. Dabei verfolgt man den Ansatz der Trilateration (im Prinzip wie bei GPS / ILT). Um aus der Signalstärke eine Strecke von einem koordinativ bekanntem Accesspoint zu einem Empfänger zu bestimmen gibt es folgende zwei Verfahren. Mit einem Ausbreitungsmodell, welches anhand der Geometrie des Gebäudes bestimmt wird oder mittels Fingerprinting, bei dem sich die Eigenschaften des Signals in verschiedenen Räumen verändern. Diese Methoden zeigen bereits, dass nicht nur die Infrastruktur in Form von Accesspoints, sondern auch Informationen über das Gebäude und deren Raumarchitektur benötigt wird, welche sich über die Zeit verändern kann. [LSD06]

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

- **RFID-Systeme:** Radio-frequency-identification - Systeme (RFID) sind sehr kostengünstige und weitverbreitete Systeme mit geringer Genauigkeit (Empfänger ist in einem bestimmten Raum / Gebäude) (siehe Abbildung 1) und Funktionalität. Die Systeme funktionieren nur in Gebäuden mit vorhandener systemspezifischer Infrastruktur.

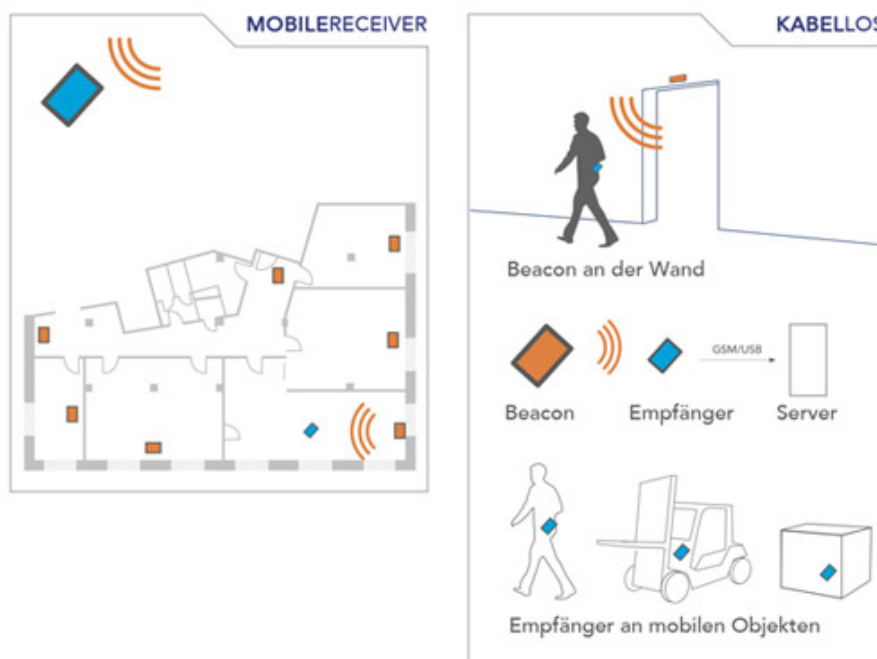


Abbildung 1: Systemskizze RFID Indoor-Positionierungs-System [Met11]

- **Integrierte-Systeme:** Integrierte Systeme beschreiben Systeme die mehrere Sensoren verwenden um eine Position zu bestimmen. Kombiniert werden dabei häufig GPS und inertielle Messeinheiten (IMU). Jedoch können auch weitere Sensoren wie z.B. die zuvor angeführten verwendet werden. Ziel ist es, die Nachteile eines Sensors mit den Vorteilen eines anderen Sensors zu kompensieren. Systeme dieser Art gibt es viele, es ist jedoch oft sehr schwer die unterschiedlichen Sensoren korrekt zu kombinieren. Die häufigste Kombination in Form von GPS-Sensoren mit einer inertialen Messeinheit hat sich jedoch, durch einen hohen Drift einer low-cost IMU und den nicht vorhandenen GPS-Empfang in Gebäuden, als ungeeignet herausgestellt. [WK10]

Jedes System hat seine Vor- und Nachteile und es kann noch keine endgültige Entscheidung getroffen werden, welches Verfahren für die Indoor-Navigation am geeignetesten ist. Fakt ist jedoch, dass durch die große Nachfrage und somit Forschung in diesem Sektor in Zukunft sehr viele unterschiedliche Systeme entstehen werden.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen, welche zur Lösung der Zielsetzung nötig waren, behandelt. Weiters werden Systemkomponenten und deren Bedeutung erläutert.

2.1 Das ILT-System

Die Firma Astrium GmbH hat ein Indoor Navigationssystem (Indoor Localization Technology) entwickelt. Das System, welches als Demonstrator vorliegt, kann die Position von Empfängern auf wenige Dezimeter bis Meter genau bestimmen ohne zusätzlicher Hilfe von IMU und gebäudespezifischer Infrastruktur. Genauere Informationen zum System und dessen Module werden im folgenden erklärt. Die Informationen zu dem ILT-System wurden ausschließlich aus [SPNM10] entnommen.

2.1.1 Allgemein

Die Navigation und Positionierung innerhalb von Gebäuden ist für sicherheitstechnische Nutzer wie z.B. Polizei, Feuerwehr oder Militär von sehr großem Interessen. Da GPS, aufgrund der geringen Signalstärke, innerhalb von Gebäuden nicht funktioniert, und es kaum möglich ist in jedem Gebäude navigationsfähige Infrastruktur zu verbauen, gilt es eine sinnvolle Alternative zu finden. Auf diese Anforderungen hin wurde das ILT-System entwickelt. Das System besteht aus 8 Transmitterstationen (TC), einer Master-Kontrollstation (MCS) und einem Empfänger. Die Transmitter senden über ihre Antenne ein multi-carrier Signal (420 - 460 Mhz) aus. Dieses Signal, welches aus 200 sub-carriers besteht, wurde von der Fa. Astrium GmbH speziell auf die Verringerung der Mehrwegeeffekte (Multipath) untersucht und bestimmt. Die Position wird daraufhin aus den Pseudostrecken im Empfänger berechnet. Das ILT-System ist in Form des aktuellen Demonstrators eines der wenigen Indoor-Funk-Systeme weltweit, welches voll einsatzfähig und funktionstüchtig ist.

2.1.2 Systemmodule und Architektur

In Abbildung 2 erhält man einen Einblick in die Systemarchitektur und deren Module:

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

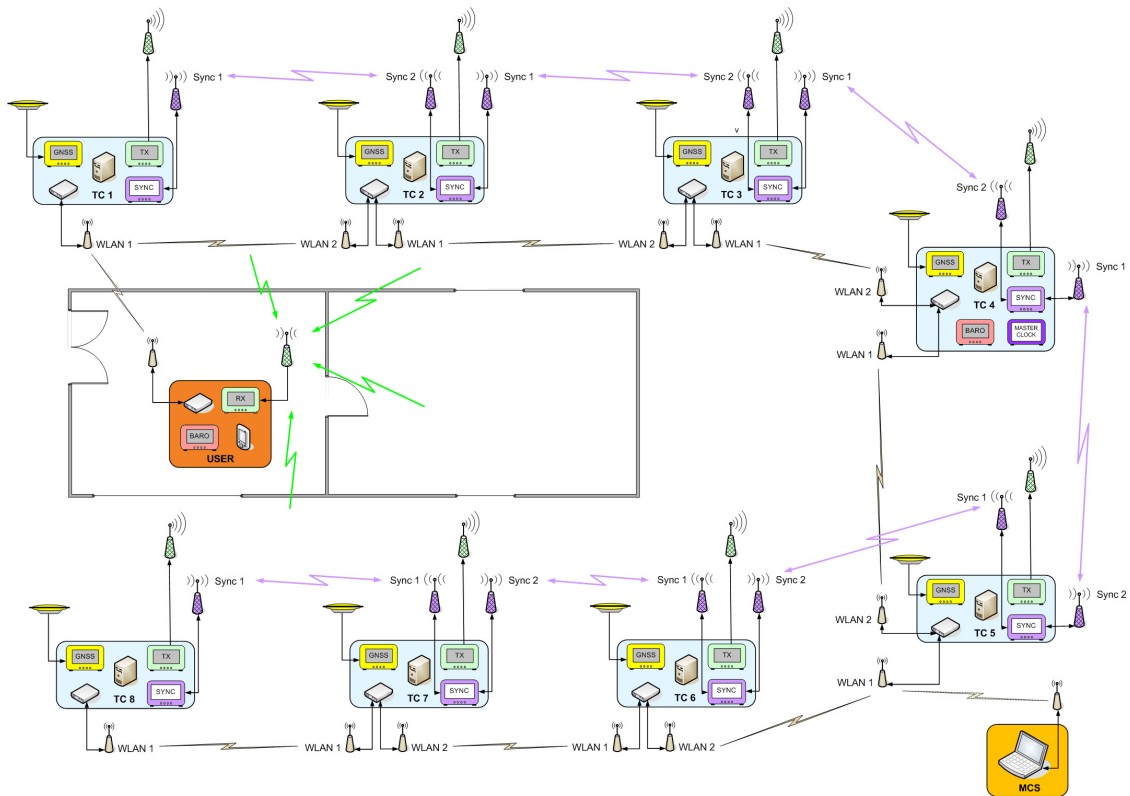


Abbildung 2: ILT-Systemarchitektur

Wie man erkennt, kommunizieren alle Transmitter, die MCS und der Empfänger über WLAN, welches in Zukunft durch eine sichere und stärkere Funkverbindungen ersetzt werden soll. Bis auf Transmitter 4 sind alle Transmitter baugleich. Transmitter 4 beinhaltet ein Barometer für die relative Höhenmessung des Empfängers (siehe Kapitel 6.2.1 auf Seite 87) und den Referenzsignalgenerator für das Sync-System. Die einzelnen Module von Transmitter, MCS und Empfänger werden im folgendem genauer beschrieben:

- Transmitter:** Transmitter 4 unterscheidet sich von den anderen Transmittern ein wenig, da dieser die Aufgabe hat die Transmitter zu synchronisieren und den Luftdruck für die relative Höhenmessung zu bestimmen. Zur Zeit bestehen die Transmitter aus handelsüblichen Komponenten und sind in etwa 1 m x 1 m x 1 m groß und 30 kg schwer (siehe Abbildung 3). Astrium UK arbeitet zurzeit an einer Miniaturisierung der Transmitterkomponenten um die Mobilität zu erhöhen. Der Transmitter besteht aus folgenden Komponenten:

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS



Abbildung 3: ILT-Systemarchitektur

- **GNSS-Einheit:** Zur Positionierung der Transmitter wird je ein Novatel Flexpak V1 GPS-Empfänger pro Transmitter verwendet (siehe Abbildung 4). Dieser Einfrequenz-Empfänger hat 17 Kanäle, misst GPS L1 C/A Code bzw. L-Band und hat einen geringen Stromverbrauch. Als Output liefert er Position, Geschwindigkeit und Zeit mit einer Auflösung bis zu 50 Hz. In Tabelle 1 sind die genauen Spezifikationen des Empfängers aufgeführt.

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS



Abbildung 4: Novatel Flexpak V1

Tabelle 1: Spezifikationen Novatel Flexpak V1

Flexpak V1	
Stromverbrauch	1.4 Watt
Anzahl der Kanäle	14 L1 GPS 2 SBAS 1 L-Band
Echtzeitperformance	SPS L1 - 1.8 m
Nutzungstemperatur	-40°C bis 85°C

Als Antenne wird die Novatel-Antenne GPS 701/702-GG verwendet (siehe Abbildung 5). Diese kann im L1 bzw. L2-Band messen und ist besonders robust gegen Umwelteinflüsse.



Abbildung 5: Novatel 701/702-GG

Jeder Transmitter überträgt nach einer 15 minütigen Positionierungsphase die GPS-Rohdaten im binären Format an die Master-Kontrollstation.

- **Sende-Einheit:** Sie besteht aus einem Signalgenerator und einer passenden omnidirektionalen Antenne. Der Signalgenerator synchronisiert sich über die Sync-Einheit mit den anderen Transmitter.
- **Sync-Einheit:** Die Aufgabe der Sync-Einheit ist, die Transmitter mit einer Genauigkeit von einer Nanosekunde synchron zu halten. Hierfür ist in Transmitter 4 zusätzlich

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

ein hochgenauer Signalgenerator angeschlossen, welcher ein 150 mHz Referenzsignal generiert. Daraufhin wird das Referenzsignal im Kettenprinzip Richtung Transmitter 1 bzw. Transmitter 8 geschickt. Jeder Transmitter korrigiert anhand des Referenzsignals seinen Signalgenerator und schickt das Sync-Signal an den nächsten Transmitter weiter. Die Sync-Verbindung zwischen den Transmittern wird über ein System (5.150 GHz- 5.857GHz) der Firma Symeo realisiert und erfordert Sichtverbindung zwischen den Empfänger- und Sendertransmitter.

Die Stromversorgung wird über 4 extrem leichte und robuste 10 Ah Lithium-Polymer Akkumulatoren der Firma Hellpower Industries garantiert. Die Einsatzdauer der Transmitter entspricht in etwa 6-8 Stunden.

- **Empfänger:** Der Empfänger besteht aus einem leistungsfähigen PC, einem Empfangsmodul, einem WLAN-Router und einem Barometer und ist auf einer Rucksacktragevorrichtung montiert (siehe Abbildung 6).

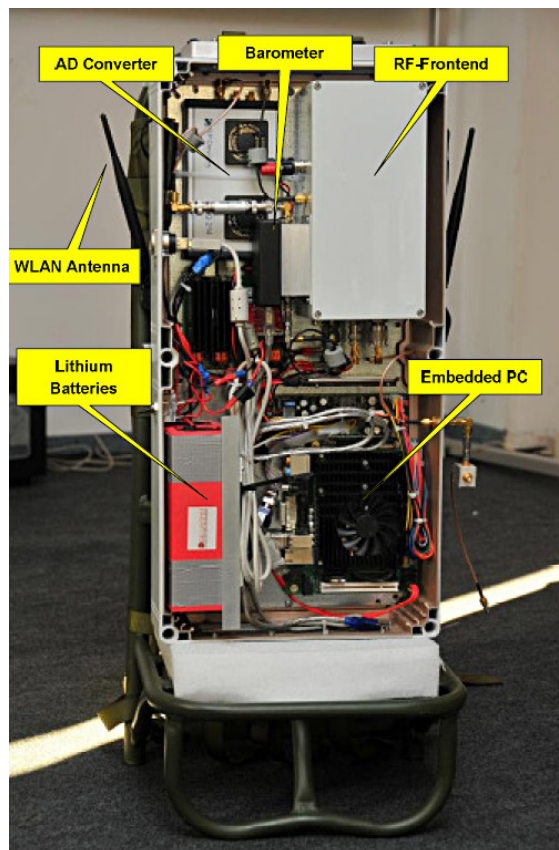


Abbildung 6: Aufbau des Empfängers

- **Empfangs-Einheit:** Diese Einheit besteht grundsätzlich aus einer Antenne, welche am Körper getragen wird, einem A/D-Wandler und einem RF-Frontend. Das Frontend selber besteht aus verschiedenen Filtern, Mixern und Verstärkern.
- **Rechen-Einheit:** Die Rechen-Einheit bekommt die Daten aus der Empfangseinheit. Mit Hilfe von bestimmten Algorithmen und einer Fast Fourier Transformation (FFT) werden 20 Positionen pro Sekunde berechnet und über WLAN an die Master-Kontrollstation übertragen.

Der Empfänger hat aus Platz und Gewichtsgründen nur 2 Akkus zur Verfügung, welche einen Einsatz von 2-3 Stunden garantieren.

- **Master-Kontrollstation:** Die MCS besteht aus einem Laptop, welcher robust gegen Umwelteinflüsse ist. Mit der MCS werden die GPS-Messungen in den Transmittern ausgelöst und nach der Messung ausgewertet. Um die Genauigkeit der Transmitterpositionen zu erhöhen werden Basislinien von den Astrium-Referenzstationen (siehe Kapitel 2.5) oder von SAPOS - Referenzstationen gebildet. Die Positionen der Transmitter werden darauf an den Empfänger übermittelt und dessen Streckenmessungen gestartet. Der Empfänger überträgt seine berechnete Positionen an die MCS zurück. In einem Visualisierungsprogramm auf der MCS wird die Position des Empfängers optisch in 3D dargestellt, womit ein guter Eindruck entsteht wo sich der Empfänger im Gebäude befindet.

2.1.3 Signaleigenschaften

Die Transmitter senden ein multi-carrier Signal (420 - 460 Mhz) aus. Das Signal, welches aus 200 sub-carriers besteht, wurde speziell auf die Verringerung der Mehrwegeeffekte (Multipath) untersucht und bestimmt. In Abbildung 7 erkennt man die Struktur des ausgesandten Signals und dessen 40 MHz Bandbreite.

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

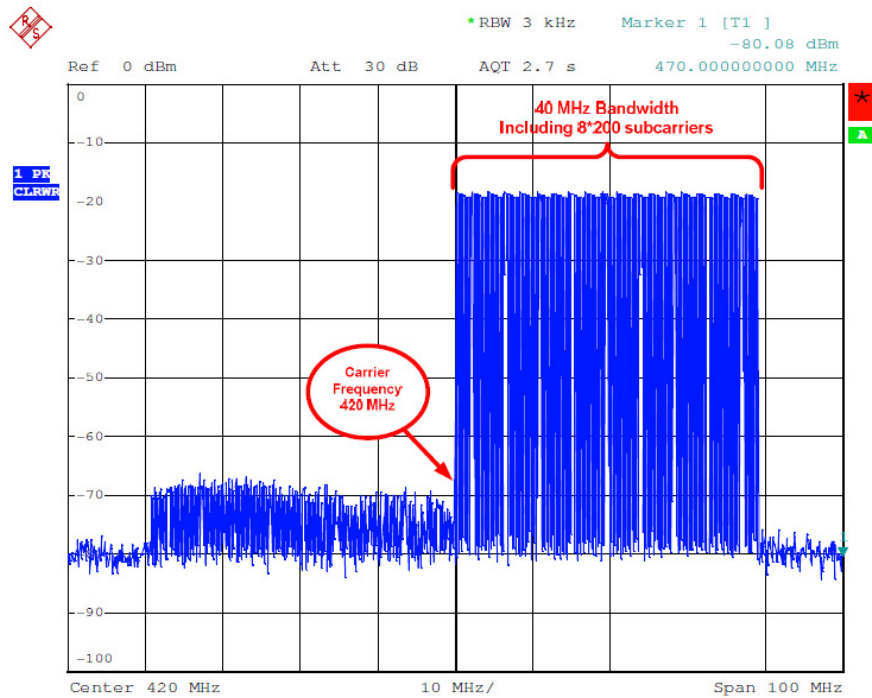


Abbildung 7: Signalstruktur

Weitere Signalparameter können aus Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Signalinformationen

Signal-Eigenschaften	
Signal-Bandbreite	40 MHz Single Side Band
Signal-Stärke in Bandbreite	10dBm
Träger-Frequenz	420 MHz
Anzahl der Sub-Träger	200
Phasenvariation	Normalverteilung
Puls-Länge	25 ns
Puls-Wiederholungsrate	5.12 ns
Eindeutigkeitsbereich	1536 m

Fortführende Informationen zu dem System können aus [SPNM10] entnommen werden.

2.2 NAVSTAR-GPS

“Navigation system with timing and ranging - global positioning system“ (NAVSTAR-GPS) ist ein wetterunabhängiges, weltraumgestütztes Navigationssystem für militärische und zivil Anwendungen [HWLW08, 309]. Mit dem System, bestehend aus mindestens 24 Satelliten, ist man in der Lage mittels eines GPS-Empfängers seine Position und Zeit weltweit zu bestimmen. Dabei wird eine direkte Sichtverbindung zwischen dem Empfänger und den Satelliten vorausgesetzt. Der Betreiber von GPS ist das Verteidigungsministerium der Vereinigten Staaten.

2.2.1 Allgemein

Die Position des Empfängers wird über Trilateration aus den bekannten Sendepositionen (Satelliten) und den gemessenen Entfernungen zum Empfänger berechnet. Die Position der Satelliten wird mittels der Navigationsnachricht an den Empfänger übertragen. Die Strecke zwischen Empfänger und Satellit wird durch die Messung der Laufzeit des Signals berechnet. In den Satelliten befinden sich hochgenaue Atomuhren, welche die exakte Synchronisation der Satelliten garantieren. Da Atomuhren aus Kostengründen nicht in kommerziellen Empfängern verbaut sind, existiert für den Empfänger ein Empfängeruhrenfehler, welcher bei der Berechnung der Koordinaten berücksichtigt werden muss. Die GPS-Satelliten senden, synchronisiert durch die Atomuhr an Bord, im gleichen Takt zur gleichen Zeit ihre Signale aus. Auf die Trägerfrequenzen (siehe Tabelle 3) wird der "Pseudo-Random-Noise-Code"(PRN-Code) aufmoduliert.

“Indem nun aus der Laufzeit des Signals mit einem Standardverfahren eine, im Vergleich grobe, Abschätzung der Entfernung gewonnen wird, läßt sich anhand der bekannten Wellenlänge ein Erwartungswert der Nulldurchgänge bilden, die sogenannte Additionskonstante. Das Hauptproblem der Berechnungen ist mithin die Mehrdeutigkeit der Additionskonstanten (Ambiguitäten). Da sie zum Zeitpunkt der ersten Messung anhand der Signal-Laufzeit nur näherungsweise bestimmt wird, kann ihr tatsächlicher Wert um etwa fünf bis zwanzig Wellenlängen abweichen. Die Kunst besteht also darin, mittels statistischer Auswertung einer möglichst großen Anzahl von Messungen die Mehrdeutigkeit aufzulösen.“ [Gla96]

**Hochgenaue ad-hoc
Positionsbestimmung mit GNSS**

Tabelle 3: GPS-Frequenzen

Frequenz	Band	Daten	Service
1575.42 MHz	L1-C/A	50 sps	C/A Code
	L1-P	50 sps - verschlüsselt	P(Y)-Code
	L1-M	verschlüsselt	M-Code
1227.60 MHz	L2-C	50 sps	C/A-Code moderat
	L2-P	Pilot	C/A-Code lang
	L2-M	verschlüsselt	M-Code
1176.45 MHz	L5-I	1000 sps	C/A-Code ab Block II-F
	L5-Q	Pilot	C/A-Code Pilot
1783,74 MHz	S-Band		Uplink
2227,50 MHz	S-Band		Downlink

Womit alle Satelliten auf der gleichen Trägerfrequenz zur gleichen Zeit senden können und durch ihren PRN-Code unterschieden ("Code Division Multiple Access - CDMA") werden. Zusätzlich zu den PRN-Codes werden die Navigationsdaten aufmoduliert. Diese beinhalten die Ephemeriden und den Almanach. Die vollständige Übertragung der Navigationsdaten an den Empfänger dauert 12.5 Minuten. Die Ephemeriden bestehen aus den sechs quasi-Kepler-Parameter, welche auf 15 Parameter erweitert werden um die zeitlichen Variationen von den Kepler-Parametern der Veröffentlichung bis zum Download der Ephemeriden zu berechnen. Mit diesen Parametern lässt sich die Position eines Satelliten berechnen. Der Almanach selber ist ein Parametersatz, bestehend aus 7 Kepler-Parametern, für die gesamte Satellitenkonstellation. Er ist zwar weniger genau als die Ephemeriden, wird jedoch benötigt um den Empfänger die Suche nach Satelliten zu erleichtern, indem man die Suche auf sichtbare Satelliten beschränkt und berechnet wann Satelliten für den Empfänger sichtbar werden. In folgender Formel erkennt man den funktionalen Zusammenhang zwischen der gemessenen Pseudostrecke ρ_i^k und der Empfängerposition (x_i, y_i, z_i) .

$$\rho_i^k = \sqrt{(x^k - x_i)^2 + (y^k - y_i)^2 + (z^k - z_i)^2} + \delta \quad (2.1)$$

$\rho \dots$ Pseudo - Range
 $k \dots$ Satellit
 $i \dots$ Empfänger
 $\delta \dots$ Uhrenfehler

Die unbekannt Parameter sind die drei Koordinaten der Empfängerposition und der Empfängeruhrenfehler δ . Somit benötigt man mindestens 4 Streckenmessungen zu 4 Satelliten um eine Position zu bestimmen. [LWH11, 536-553].

2.2.2 Koordinatensysteme

Bei der Nutzung von GPS und von GPS-Referenzstationen werden in Europa verschiedene unterschiedliche Koordinatensysteme verwendet. Dabei muss zwischen dem mathematischen Kon-

zeit (System) eines Koordinatensystems und dessen Realisierung (Frame) unterschieden werden. [WK10].

- **World Geodetic System 1984 (WGS84):** Dieses System ist die Grundlage von GPS. Es ist ein globales bestangepasstes System. GPS-Absolutkoordinaten werden üblicherweise in WGS 84 Koordinaten angegeben.
- **International Terrestrial Reference Frame (ITRF):** Das ITRF ist konsistent mit dem WGS-System und stimmt weltweit im Zentimeterbereich überein. Die Genauigkeit der ITRF-Referenzstationen beträgt nur wenige Zentimeter. Im Vergleich dazu hatten die Transit-Referenzstationen, von welchen das WGS84 abgeleitet wurde, nur eine Genauigkeit von 1-2 Meter. [HWLW08]
- **European Terrestrial Reference Frame (ETRF):** Das ETRF ist ein Bezugssystem welches mit der eurasischen Kontinentalplatte fest verbunden ist. Die Realisierung des System ETRS89 stimmte in der Epoche 1989 mit dem ITRS überein. Seit dem führt das ETRS89 eine Bewegung von in etwa 2.5 cm pro Jahr im Bezug zum ITRS aus. Positionen von europäischen Referenzstationen wie z.B. SAPOS, APOS sind in ETRS89-Koordinaten angegeben, was bei der Berechnung von Basislinien zu berücksichtigen ist.

ITRF und ETRF sind durch ihre ständige Überprüfung durch Monitorstationen hochgenaue, physikalische und zeitfeste Referenzrahmen (Frame). [LWH11]

2.2.3 Fehlereinflüsse

Bei der Positionsbestimmung mittels GPS gibt es zahlreiche Fehlereinflüsse (siehe Abbildung 8), welche die Positionsgenauigkeit verschlechtern. Diese können grob in drei Kategorien eingeteilt werden [LWH11]:

- **Fehlerquellen des Satelliten:** Die Satellitenbahnen und Satellitenzeit wird durch Parameter der Ephemeriden präzisiert. Durch diese selbstverständlich nicht exakte Vorbestimmung können Fehler in Position und Zeit entstehen.
- **Signalausbreitungsfehler:** Da sich das Signal auf dem Weg vom Satelliten zum Empfänger durch die Atmosphäre bewegen muss, kommt es hierbei zu Fehlern. Unterschieden wird zwischen Ionosphären- und Troposphärenfehler. Dank der dispersiven Eigenschaft der Ionosphäre kann ihr Fehlereinfluss durch das Verwenden von Zweifrequenz-Empfänger eliminiert werden. Eine weitere Fehlerquelle ist der Mehrwegeeffekt, welcher entsteht wenn ein Signal nicht auf direkten Wege zu einem Empfänger gelangt, sondern davor von einer reflektierenden Fläche, wie z.B. einer Hauswand, abgelenkt wird. Der dadurch entstehende Mehrweg führt zu einem Fehler.
- **Empfängerfehler:** Das im Empfänger ankommende Signal ist sehr schwach (10^{-16} Watt) und wird durch das Umgebungsrauschen stark verfälscht, was zu einem Messfehler führt. Bei

höherwertigen Empfängern können durch die exaktere Auswertung des Signals, das geringere Phasenrauschen der Empfängeruhr und der geringen Veränderung des Antennenzentrums zusätzlich höhere Genauigkeiten erzielt werden.

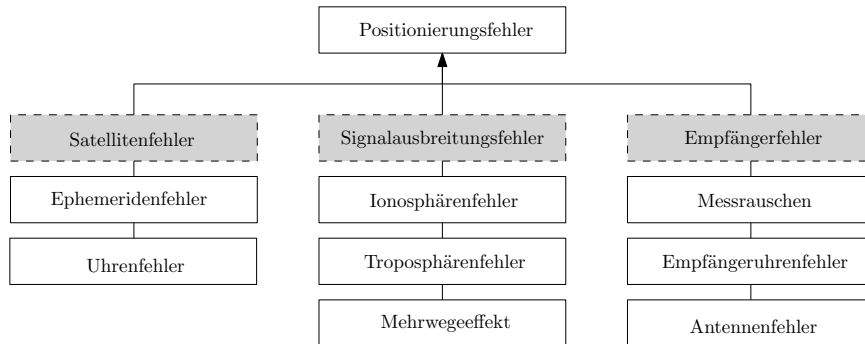


Abbildung 8: Zusammensetzung des Positionierungsfehlers

2.2.4 Basislinienberechnung

Die Streckenmessung wird durch unterschiedliche Fehlerquellen (Satelliten, Empfänger und Ausbreitungsweg) verfälscht. Beobachtet man zur gleichen Zeit von zwei nahegelegenen Positionen A und B den gleichen Satelliten (single differences), treten die gleichen Satelliten- und Ausbreitungsfehler sowohl in der Position A als auch in der Position B auf. Durch Differenzbildung der beiden Strecken kürzen sich die Fehler und man erhält den Basislinienvektor. Der Basislinienvektor gibt die Richtung und Strecke zwischen A und B wieder. Kennt man den Punkt A koordinativ, erhält man durch Addition des Basislinienvektors den Punkt B. Diese Verfahren nennt sich u.a. relative Positionierung, da zwei GPS-Stationen relativ zueinander positioniert werden.

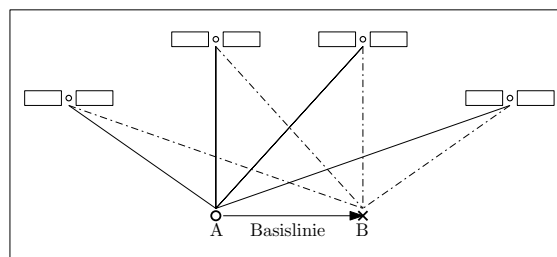


Abbildung 9: Prinzip der Basislinie

Wenn man das Verfahren erweitert und von den Empfängern zu zwei Satelliten misst (double differences), lassen sich somit auch die empfängerspezifischen Fehler eliminieren. Somit sind relative Beobachtungen größtenteils frei von systematischen Einflüssen (siehe Tabelle 4). [HWLW08]

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

Tabelle 4: Vergleich der Fehlereinflüsse

Fehlerquelle	Absolut GPS L1 [m]	Relatives Verfahren [m]
Ephemeriden Daten	2.1	< 0.1
Satelliten Uhr	2.1	< 0.1
Ionosphäre	4.0	< 0.1
Troposphäre	0.7	< 0.1
Mehrwegeffekt	1.4	< 0.1
Empfänger Messung	0.5	< 0.1
Messfehler	5.3	< 0.1

Die Genauigkeit hängt zusätzlich von der Beobachtungsdauer und der Positionsgenauigkeit der Basisstation ab. Somit erkennt man den klaren Genauigkeitsvorteil der relativen Positionierung zur absoluten Positionierung. Der Nachteil besteht jedoch darin, dass man bekannte, hochgenaue Basisstationskoordinaten benötigt oder von einem lokalen Positionierungsservice (SA-POS, ASCOS) abhängig ist. Zusätzlich werden mindestens zwei GPS-Empfänger für die relative Positionsbestimmung benötigt.

2.2.5 Ausblick

GPS war bis vor kurzem das einzige operationelle satellitengestützte Navigationssystem. Russland entwickelte während des Kalten Krieges ihr eigenes Navigationssystem GLONASS, welches sich hauptsächlich durch dessen Modulationsart ("Frequency Division Multiple Access - FDMA") unterschied. Bei FDMA sendet jeder Satellit auf einer eigenen Frequenz und kann somit eindeutig zugeordnet werden. Nach dem Kalten Krieg wurde das System vernachlässigt und war nicht mehr voll einsatzfähig. In jüngster Zeit wurde wieder viel Geld von russischer Seite aufgebracht um GLONASS in naher Zukunft wieder volloperational zu machen. In Europa (Galileo) und China (COMPASS) wird auch an einem ähnlichen Navigationssystem gearbeitet, welches in Zukunft zu voller Einsatzfähigkeit gebracht werden soll. Durch die hohe Redundanz von satellitengestützten Navigationssystemen wird sich die Genauigkeit und Verfügbarkeit der Positionsbestimmung in Zukunft erhöhen. Aus Tabelle 5 können nähere Informationen zu den unterschiedlichen Navigationssystemen entnommen werden. [LWH11].

**Hochgenaue ad-hoc
Positionsbestimmung mit GNSS**

Tabelle 5: Übersicht über die unterschiedlichen Satellitennavigationssysteme

	GPS	GLONASS	Galileo	COMPASS
Nominelle Konstellation	MEO (21+3/6)	Walker MEO (24/3/2)	Walker MEO (27/3/1) + 3 nicht aktive Spares	GEO (5) + IGSO (3) + MEO (27)
Aktuelle Konstellation (Juni 2010)	32 Sat	20 aktive Sat, 3 nicht aktive Sat	2 Testsatelliten	3 GEO + 1 MEO
MEO-Orbit	zirkular 55° - Inklination	zirkular 64.8° - Inklination	zirkular 56° - Inklination	zirkular 55° - Inklination
Halbachse	26560 km	25440 km	29601.3 km	27840 km
Umlaufperiode	11 Std. 58 min	11 Std. 15 min	14 Std. 4 min	
Uhrentyp	Rubidium	Cäsium	Rubidium, Hydrogen-Maser	
Referenzsystem	WGS-84 (ITRF)	PZ-90	GTRF (ITRF)	
Modulation	CDMA	FDMA	CDMA	CDMA

2.3 Statistische Verfahren

“Zu den wesentlichen Problemen in der Geodäsie und Geoinformation gehört die Beurteilung eigener und fremder Messgrößen sowie die Angabe von verständlichen, auch interdisziplinären akzeptierten Qualitätsmerkmalen. Zur Lösung dieses Problems sind mathematisch-statistische Konzepte auf die fachspezifischen Fragestellungen zu übertragen.” [Nie08]. Die Informationen und Nomenklatur des folgenden Kapitels wurde zum größten Teil aus [Nie08] entnommen.

2.3.1 Grundlagen

Messwerte in der Geodäsie können durch das Konzept der Zufallsvariablen beschrieben und beurteilt werden. Dies bedeutet, dass die Messungen einer bestimmten Begebenheit nicht immer die selben sind. Jedoch variieren diese Messungen üblicherweise um einen statistisch definierten Bereich. Aus den Messungen können der Mittelwert und die Streuung der Zufallsvariablen berechnet werden. Dabei muss man folgende Unterscheidungen berücksichtigen:

- **Präzision:** ein Maß für die Streuung der Zufallsvariablen
- **Genauigkeit:** beschreibt wie weit der Mittelwert der Zufallsvariablen vom wahren Wert abweicht

Um den Mittelwert der Zufallsvariablen und somit das Ergebnis einer Messreihe zu bestimmen gibt es mehrere Mittelwert-Operatoren. Folgend werden zwei davon genauer erläutert:

- **Arithmetisches Mittel \bar{x} :** Unter dem arithmetischen Mittel versteht man das gebräuchlichste Verfahren zur Mittelwertbildung. Dabei wird die Summe der Messwerte durch die Anzahl der Messwerte n dividiert. Sollte die Messreihe nur aus zufälligen Abweichungen bestehen kann dieses Verfahren auch als optimale Schätzung eingestuft werden.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \quad (2.2)$$

$l \dots$ Messwert

$n \dots$ Anzahl der Messungen

- **Median x_m :** Sollte der Verdacht bestehen, dass die Messgrößen durch grobe Fehler verfälscht sein könnten, würde das arithmetische Mittel dadurch auch verfälscht werden. Der Median ist in dieser hinsicht ein robusteres Verfahren zur Schätzung des Mittels der Zufallsvariablen. Dazu müssen alle Messwerte der Größe nach sortiert werden, sodass man einen Vektor l^g erhält an dessen erster Stelle der kleinste Messwert steht und an dessen letzter Stelle der Größte. Der Median x_m ist in diesem Fall der mittlere Wert:

$$x_m = \begin{cases} l_{(n+1)/2}^g & \text{wenn } n \text{ ungerade} \\ \frac{1}{2}(l_{n/2}^g + l_{(n+2)/2}^g) & \text{bei } n \text{ gerade} \end{cases} \quad (2.3)$$

Zum Berechnen der Präzision einer Messreihe können zwei unterschiedliche Verfahren verwendet werden:

- **Standardabweichung:**

- **Empirische Standardabweichung** s_0 :

$$v = \begin{bmatrix} \bar{x} - l_1 \\ \bar{x} - l_2 \\ \vdots \\ \bar{x} - l_n \end{bmatrix} \quad s_0 = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (2.4)$$

Hiermit erhält man den Wert für die Präzision in Form der empirischen Standardabweichung. Diese ist abhängig von dem arithmetischen Mittel \hat{x} und hat durch dessen Berechnung einen Freiheitsgrad $(n-1)$ verloren.

- **Theoretische Standardabweichung** σ_0 : Sollte jedoch der wahre Wert \tilde{X} einer Messreihe bekannt sein kann man mit diesem die theoretische Standardabweichung berechnen.

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \tilde{X} - l_1 \\ \tilde{X} - l_2 \\ \vdots \\ \tilde{X} - l_n \end{bmatrix} \quad \sigma_0 = \sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2} \quad (2.5)$$

Da hier der Mittelwert nicht geschätzt werden muss beträgt der Freiheitsgrad n . Die theoretische Standardabweichung entspricht in den meisten Fällen Herstellerangaben, welche eine große Rolle bei statistischen Tests spielen.

- **Median Average Deviation:** Der MAD ist ein robustes Verfahren um die Streuung bzw. Präzision einer Messreihe zu bestimmen. Wie der Name es schon erahnen lässt steht das Verfahren im unmittelbaren Zusammenhang mit dem Median x_m . Wie auch beim Median ist der MAD robuster gegen grobe Fehler als die Standardabweichung.

$$MAD = median \begin{bmatrix} |x_m - l_1| \\ |x_m - l_2| \\ \vdots \\ |x_m - l_n| \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Die Messungen sind mit Messunsicherheiten behaftet, welche man grob in drei Untergruppen unterteilen kann:

- **Zufällige Messunsicherheiten:** Zufällige Messunsicherheiten sind die Gesamtheit von einer Vielzahl von kleinen Fehlern, welche durch Bedienung, äußere Einflüsse und durch das

Messgerät selber entstehen. Aus zufälligen Fehlern kann eine statistische Verteilungsfunktion abgeleitet werden und somit ein Modell für die statistische Verteilung von zufälligen Messwerten erstellt werden. Das bekannteste Modell ist dabei die von C.F. Gauß entwickelte Normalverteilung mit der Varianz als Kenngröße.

- **Systematische Messunsicherheiten:** Systematische Messunsicherheiten führen dazu, dass sich selbst nach mehrmaligen Messen der empirische Mittelwert von dem wahren Wert unterscheidet und sich eventuell immer weiter von diesem entfernt. Solche systematischen Messunsicherheiten können durch Dekalibration des Messgeräts und anderen nicht zufälligen Fehlern (Multipath, etc.) entstehen. Um diese Unsicherheiten nach der Messung zu beseitigen bedarf es eines individuellen Modells, welches meistens nicht bekannt ist.
- **“Fehler“ in den Zufallsvariablen:** Diese Fehler entstehen durch Fehler in den Beobachtungen, Zuordnungsfehlern, durch Rundungen oder durch falsches speichern bzw. abschreiben von Messwerten. Diese Messunsicherheiten unterscheiden sich sehr stark von den zufälligen und systematischen Messunsicherheiten und können somit bei genügender Redundanz auch erkannt werden. Sollten solche Fehler in Messungen gefunden werden können diese nicht mehr für die weitere Auswertung verwendet werden.

Da Zufallsvariablen in den meisten Fällen mit zufälligen Messunsicherheiten behaftet sind spielt die Normalverteilung eine sehr große Rolle. Die Normalverteilung ist durch den Erwartungsbzw. Mittelwert μ und der Varianz σ^2 definiert. Dabei lautet die Dichtefunktion folgend:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.7)$$

Daraufhin kann man durch die symmetrische Verteilung auf den Erwartungswert der Normalverteilung schließen:

$$E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx = \mu \quad (2.8)$$

Weiters ist die Dichtefunktion für den gesamten Definitionsbereich $f(x) > 0$ und hat als Gesamtfläche und somit Maximalwahrscheinlichkeit den Wert 1:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (2.9)$$

Die Standardabweichung σ entscheidet über die Form der Dichtefunktion und bestimmt auch den Wendepunkt der Glockenkurve.

2.3.2 Varianzfortpflanzung

In der Geodäsie und in anderen technischen Sparten ist man oft nicht an dem Ergebnis von einzelnen Messungen interessiert, sondern an von den Messungen abgeleiteten Größen. Ein Beispiel wäre hier die GPS-Messung. Hierbei werden zwar Pseudostrecken gemessen jedoch interessiert man sich für die aus den Pseudostrecken abgeleitete Position des Empfängers. Um nun von den Genauigkeiten der Pseudostrecken, Genauigkeiten für die Position abzuleiten bedarf es der Varianz- oder Fehlerfortpflanzung. Da die funktionalen Zusammenhänge in den meisten Fällen nichtlinear sind, wird folgend die Varianzfortpflanzung von nichtlinearen Funktionen beschrieben. Die Formeln beschränken sich auf den eindeutig bestimmten Fall.

- **Linearisierung:** Der erste Schritt bei der Varianzfortpflanzung ist die Linearisierung des funktionalen Zusammenhangs. Über das Verfahren der Fixpunktiteration kann jede nichtlineare Funktion, bei genügend vorhandenen Näherungswerte x_0 , durch eine Taylorreihe approximiert werden. Nach Abbrechen der Reihe nach Glieder höherer Ordnung o^2 erhält man folgende Funktion:

$$f(x) = f(x^0) + \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{x^0} (x_1 - x^0) + \left. \frac{\partial f}{\partial x_2} \right|_{x^0} (x_2 - x^0) + \dots + \left. \frac{\partial f}{\partial x_n} \right|_{x^0} (x_n - x^0) \quad (2.10)$$

- **Überführung in Matrix-Vektor Form:** Nach der Linearisierung können die Differentialquotienten in Matrix-Vektor-Form gebracht werden. Somit werden auch Korrelationen zwischen verschiedenen Messgrößen beachtet. Im ersten Schritt wird die Zufallsvariable L in einen Näherungswert L^0 und in die verkürzte Beobachtungsvariable l zerlegt:

$$L = L^0 + l \quad (2.11)$$

Es kann danach ein Vektor bzw. eine Matrix aus den Differentialquotienten erstellt werden wobei u für die Anzahl der Parameter und n für die Anzahl der Beobachtungen steht. Diese Matrix A wird als Jacobi-Matrix bezeichnet:

$$A_{(n,u)} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial L_1} \right|_{L^0} & \left. \frac{\partial f_1}{\partial L_2} \right|_{L^0} & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial L_u} \right|_{L^0} \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial L_1} \right|_{L^0} & \left. \frac{\partial f_2}{\partial L_2} \right|_{L^0} & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial L_u} \right|_{L^0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial L_1} \right|_{L^0} & \left. \frac{\partial f_n}{\partial L_2} \right|_{L^0} & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial L_u} \right|_{L^0} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Somit kann man das Varianzfortpflanzungsgesetz folgend festlegen:

$$\Sigma_{ff} = A \Sigma_{ll} A^T \quad (2.13)$$

Wobei die Varianz-Kovarianz Matrizen Σ folgenden Aufbau haben:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1j} \\ \vdots & \sigma_{22}^2 & \cdots & \sigma_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{i1} & \cdots & \cdots & \sigma_{jj}^2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Aus der Varianz-Kovarianz Matrix kann man neben den Varianzen, welche in der Hauptdiagonale stehen, auch den Korrelationskoeffizient zwischen den Parametern bestimmen:

$$r_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_{ii} \cdot \sigma_{jj}} \quad (2.15)$$

Der Korrelationskoeffizient beschreibt die stochastische Abhängigkeit zwischen Zufallsvariablen. Bei $p_{ij} \rightarrow 0$ sind die Zufallsvariablen kaum korreliert, bei $p_{ij} \rightarrow \pm 1$ stark korreliert.

2.3.3 Ausgleichsrechnung

“Um ein System zu erforschen und dessen Mechanismen zu ergründen, wählt man natürlich Beobachtungen, die maximale Informationen über diese System enthalten.” [Pai07]

Um ein System zu beschreiben wird ein mathematisches Model verwendet, welches von Modellparametern x abhängig ist. Die Modellparameter werden mit Hilfe von Beobachtungen bestimmt. Für ein exakt bestimmtes System muss die Anzahl der Beobachtungen n gleich groß sein wie die Anzahl der unbekanntem Modellparameter u . Führt man jedoch mehr Beobachtungen als Parameter ein gilt das System als überbestimmt. Dadurch lässt sich nicht nur das Modell verbessern sondern auch eine Qualitätsaussage über die Parameter treffen. Nachdem es sich bei den Beobachtungen um fehlerbehaftete Zufallsvariablen handelt ist eine exakte Lösung nicht möglich. Stattdessen wird durch die Ausgleichsrechnung die bestmögliche Lösung gesucht (Optimierungsmethode). Die Optimierungen werden durch folgende Normen beschrieben:

- **L_1 -Norm:** führt zu einem robusten Ausgleichsverfahren.

$$\|v\|_1 = \sum_{i=1}^n |v_i| \quad (2.16)$$

- **L_2 -Norm:** Nennt sich die Methode der kleinsten Quadrate (least-squares norm) und ist die Standardnorm für Ausgleichsaufgaben in der Geodäsie. Dass hat sie ihrer Eigenschaft zu verdanken, zu linearen Gleichungssystemen zu führen. Weiters ist die Norm eng mit der Normalverteilung verknüpft. Ein großer Nachteil ist jedoch fehlende robustheit gegen grobe Fehler.

$$\|v\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n |v_i|^2} \quad (2.17)$$

- **L_∞ -Norm:** Die Norm bezieht sich auf das größte Absolutelement eines Vektors. Sie wird verwendet wenn Fehler in einem bestimmten Bereich liegen und in diesen Bereich mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auftreten. Die Norm ist extrem anfällig auf grobe Fehler und kann somit als Gegenteil der L_1 -Norm gesehen werden.

$$\|v\|_\infty = \lim_{p \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^n |v_i|^p \right)^{1/p} = \max_i |v_i| \quad (2.18)$$

Es gilt nun eine Beziehung zwischen den Beobachtungen l und den Modellparametern x zu bestimmen. Dafür wird die Design-Matrix A eingeführt. Da es sich bei den Beobachtungen um Zufallsvariablen handelt sind diese fehlerbehaftet und der Zusammenhang muss um Verbesserungen v erweitert werden.

$$l \neq Ax \quad l + v = Ax \quad (2.19)$$

Es kommt die L_2 -Norm zu tragen mit dem Minimumsprinzip der Methode der kleinsten Quadrate:

$$\Omega = v^T v \rightarrow \min \quad (2.20)$$

Daraus kann man sich den Lösungsvektor für die geschätzten Parameter \hat{x} herleiten und erhält folgende Formel:

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T l \quad (2.21)$$

Bei den Formeln ist davon ausgegangen worden das die Beobachtungen gleichgenau sind und der funktionale Zusammenhang linear ist. Da dies in den meisten Fällen nicht der Fall ist, muss der Formerlaperat erweitert werden. Es wird zusätzlich das stochastische Modell hinzugefügt:

$$\Sigma_{ll} = \sigma_0^2 Q_{ll} \quad P = Q^{-1} \quad (2.22)$$

Der unbekannte Varianzfaktor σ_0 wird mit 1 angenommen und im Ausgleich mitgeschätzt. Die Gewichtsmatrix P entspricht der inversen Kofaktorenmatrix der Beobachtungen Q_{ll} . Folgend erhält man:

$$\hat{x} = (A^T P A)^{-1} A^T P l \quad Q_{xx} = (A^T P A)^{-1} \quad (2.23)$$

Die ausgeglichenen Beobachtungen \hat{l} beschreiben die ursprünglichen Beobachtungen l plus den berechneten Verbesserungen v daraus kann man sich folgende Zusammenhänge herleiten:

$$\hat{l} = l + v = A \hat{x} \quad v = \hat{l} - l \quad (2.24)$$

Zugehörig zu den Verbesserungen und den ausgeglichenen Beobachtungen können deren Genauigkeiten in Form der Kofaktoren Matrix der ausgeglichenen Beobachtungen $Q_{\hat{t}}$ und der Kofaktoren Matrix der Verbesserungen Q_{vv} bestimmt werden.

$$Q_{\hat{t}} = A Q_{xx} A^T \quad Q_{vv} = Q_{ll} - Q_{\hat{t}} \quad (2.25)$$

Nach der Berechnung ist es möglich den a-posteriori Varianzeinheitenfaktor s_0^2 zu berechnen. Dieser sollte bei korrekten Messungen und stochastischen Modell dem Varianzeinheitenfaktor σ_0^2 , welcher mit 1 angenommen wird, entsprechen:

$$s_0^2 = \frac{v^T P v}{f} \quad f = n - u \quad (2.26)$$

Somit hat man alle Bestandteile um eine Aussage über die Messungen und deren Genauigkeit zu tätigen. Jedoch sollten Fehler bei der Berechnung erkannt werden. Dafür gibt es die Möglichkeit einer simplen numerischen Probe in Form eines Vergleiches:

$$v^T P v = l^T P l - (A^T P l)^T \hat{x} \quad (2.27)$$

2.3.4 Qualitätsbeurteilung

In der Geodäsie und auch in vielen anderen Disziplinen ist es wichtig eine Aussage über die Qualität der Messungen und deren Ergebnisse zu tätigen. Da man solche Aussagen nicht allgemein tätigen kann müssen diese von den Anforderungen einer Aufgabenstellung abgeleitet werden. Man kann diese Qualitätsbeurteilung allgemein in zwei Kategorien einteilen:

- **Genauigkeit:** Ist ein Maß für die Qualität und Präzision der unbekannt Parameter wenn die funktionalen Beziehungen zwischen den Messungen und den geschätzten Parametern korrekt sind. Zusätzlich müssen die Annahmen der Standardabweichungen und der Korrelationen korrekt sein. Die Genauigkeit wird somit oft als Qualität des Entwurfs bezeichnet und ist abhängig von der der Kofaktorenmatrix der Parameter Q_{xx} . Weiters muss auch der Varianzfaktor σ_0^2 berücksichtigt werden. Die Größenordnung der Genauigkeiten ist von Anwendung zu Anwendung verschieden und müssen somit genau deklariert werden. Wie man an der Formel der Q_{xx} Matrix erkennen kann sind für deren Berechnung keine Beobachtungen erforderlich und kann somit auch im Rahmen der Simulationsrechnung im vorhinein bestimmt werden. Es können folgenden genauigkeitrelevanten Eigenschaften extrahiert werden:

- **Standardabweichungen s_{x_i} der einzelnen Koordinaten:**

$$s_{x_i} = s_0 \sqrt{q_{x_i x_i}} \quad (2.28)$$

- **mittlere Koordinatengenauigkeiten**

- **Fehler- und Konfidenzellipsen:** Fehlerellipsen dienen zur Darstellung von minimalen Fehler, maximalen Fehler und deren Ausrichtung in einem Punkt. Die Konfidenzellipse ist eine nach Signifikanzniveau skalierte Fehlerellipse. Der minimale Fehler wird durch die kleine Halbachse b , der maximale Fehler durch die große Halbachse a und die Ausrichtung durch den Richtungswinkel Θ beschrieben:

$$a = \sqrt{\frac{s_0^2}{2}(q_{xx} + q_{yy} + \omega)} \quad b = \sqrt{\frac{s_0^2}{2}(q_{xx} + q_{yy} - \omega)} \quad (2.29)$$

$$\tan 2\Theta = 2 \frac{q_{xy}}{q_{xx} - q_{yy}} \quad \omega = \sqrt{(q_{xx} - q_{yy})^2 + 4q_{xy}^2} \quad (2.30)$$

- **Punktfehler:**

$$s_{xy_i}^H = s_0 \sqrt{q_{x_i x_i} + q_{y_i y_i}} \quad (2.31)$$

- **relative und absolute Fehler- bzw. Konfidenzellipsen**

- Konfidenzhyperellipsoid, Rayleigh-Relation, Eigenwertkriterien, Hauptkomponentenanalyse, Kriteriumsmatrizen u.a

- **Zuverlässigkeit:** Wird auch oft als Qualität der Realisierung bezeichnet und gibt ein Maß, wie gut die Beobachtungen im Ausgleichsmodell zu kontrollieren sind und wie groß deren Auswirkungen auf die zu schätzenden Parameter sind. Diese Aspekte können aus der Kofaktorenmatrix der Verbesserungen Q_{vv} abgeleitet werden. Generell soll die Zuverlässigkeit den Anwender vor groben Fehlern in den Messungen und somit vor falscher Auswertungen schützen.

- **Redundanzanteile:** Die Redundanzanteile geben an wie gut eine Messungen kontrolliert ist. Ein Redundanzanteil von $r_i \rightarrow 0$ gibt an, dass eine Messungen schlecht bzw. garnicht kontrolliert ist. Ein Fehler in der Messung könnte nicht erkannt werden. Bei einem Redundanzanteil von $r_i \rightarrow 1$ wäre die Messung weit überbestimmt und somit überflüssig, da sie nichts mehr zum Ergebnis beiträgt. Die Redundanzanteile r_i und die Gesamtredundanz r lassen sich aus der Kofaktorenmatrix der Verbesserungen Q_{vv} bestimmen:

$$r_i = (q_{vv})_{ii} \quad sp(Q_{vv}) = n - u = r \quad (2.32)$$

Aus den Redundanzanteilen können darauf die standardisierten Verbesserungen w_i berechnet werden. Diese folgen der Standardnormalverteilung und sind somit ideal zur Kontrolle auf Ausreißer geschaffen.

$$w_i = \frac{v_i}{\sigma_0 \sqrt{(q_{vv})_{ii}}} \quad (2.33)$$

- **Minimal aufdeckbarer Ausreißer:** Dieses Verfahren soll bei einer Ausgleichung mit homogenen Redundanzanteilen zeigen wie stark sich ein Fehler in der Beobachtung i in

dessen Verbesserung auwirkt und ab wann ein solcher als Fehler mit einer bestimmten Testgüte erkannt werden kann.

$$\nabla_i = \frac{\sigma_i}{\sqrt{r_i}} |\delta_0| \quad (2.34)$$

Der Nichtzentralitätsparameter δ_i hängt von der gewählten Irrtumswahrscheinlichkeit α und der Macht $1 - \beta$ des globalen Tests ab und setzt sich folgend zusammen:

$$\delta_0 = z_{1-\alpha/2} - z_\beta \quad (2.35)$$

Wobei z für das Quantil der Normalverteilung steht. Die Nabla-Werte ∇_i werden gerne geometrisch als anschauliches Maß für die Zuverlässigkeiten der Messungen verwendet.

- **Äußere Zuverlässigkeit:** Sie zeigt den Einfluss der gerade nicht mehr aufdeckbaren Modellfehler auf die Parameter. Die äußeren Zuverlässigkeiten können den Konfidenz-ellipsen direkt gegenübergestellt werden. Gezeigt soll werden wie stark sich ein gerade nicht mehr aufdeckbarer Fehler in einer Beobachtung l_i auf alle anderen Parameter auswirkt. Dies ist ein wichtiger Indikator der Qualität der Ausgleichung und deren Geometrie.

$$\Delta \hat{x}_i = (A^T P A)^{-1} A^T P \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ 0 \\ \nabla_i \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \hat{x}_{i-1} \\ \Delta \hat{x}_i \\ \Delta \hat{x}_{i+1} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Die äußeren Zuverlässigkeiten AZ für jede einzelne Messung erhält man mit folgenden Zusammenhang:

$$AZ_i = \sqrt{\Delta \hat{x}_i^T Q_{xx}^{-1} \Delta \hat{x}_i} \quad (2.37)$$

Die äußere Zuverlässigkeit ist dabei ein datumsunabhängiges, skalares Maß, welches laut [BW08] kleiner als 10 gehalten werden sollte.

2.3.5 Lagerung

Durch die Ausgleichung mittels der Methode der kleinsten Quadrate wird lediglich die relative Beziehung zwischen den Messpunkten, die innere Geometrie, bestimmt. Das geodätische Datum, im Falle eines 2D-Netzes Lage, Orientierung und Maßstab, werden in der Ausgleichung nicht festgelegt. Wieviel Parameter bestimmt werden müssen beschreibt der Datumsdefekt, welcher für verschiedene Anwendungen unterschiedlich ist (siehe Tabelle 6).

**Hochgenaue ad-hoc
Positionsbestimmung mit GNSS**

Tabelle 6: Datumsdefekte und Datumparameter

Netzdimension	Typ	Datumsdefekte	Datumparameter d
1	Höhennetz	1	Translation in z
2	Lagenetz	4	Translation in x Translation in y Rotation um z Maßstab
3	3D-Netz	7	Translation in x Translation in y Translation in z Maßstab Rotation um x Rotation um y Rotation um z Maßstab

Um diese Datumsproblematik zu lösen gibt es primär zwei grobe Unterscheidungen:

- **Zwangsfreie Lagerung:** Hierbei wird die innere Geometrie des Netzes nicht zerstört. Geometrisch kann man sich vorstellen, dass ein starres Netz solange verschoben, rotiert und skaliert wird bis es gewisse Eigenschaften erfüllt, welche wären:
 - **Nullvarianzbasis:** Es werden exakt soviele Koordinaten festgehalten wie Datumparameter. Die Varianz in den Lagerungskordinaten wird zu 0.
 - **Minimale-Varianz-Basis:** Es wird auf allen Punkten gelagert. Die Lagerung strebt die minimale Varianz in allen Lagerungspunkten an.
 - **Datumspunkte:** Das Netz wird nur auf bestimmten Lagerungspunkten gelagert. Diese Lagerungspunkte erhalten eine minimale Varianz.
- **Gezwängte Lagerung:** Hierbei wird die innere Geometrie des Netzes zerstört. Es wird ein Zwang auf das Netz ausgeübt, welcher zu einer Deformation des Netzes führt. Dies kann u.a. durch folgende 2 Verfahren entstehen:
 - **Gezwängte Ausgleichung:** Es werden mehr Koordinaten festgehalten als benötigte Datumparameter. Das Netz kann dadurch stark deformiert werden. Bei einer hochgenauen Bestimmung der inneren Geometrie würde dies zu einem Genauigkeitsverlust führen.
 - **Weiche Lagerung:** Die weiche Lagerung ist eine sehr flexible Art der Lagerung, welche größtenteils in dieser Arbeit verwendet wurde. Dabei kann den Lagerungspunkten eine stochastische Vorinformation in Form von Varianz und Kovarianz zugeordnet werden. Die Lagerungspunkte wären im Fall dieser Arbeit die ILT-Transmitter. Deren Koordinaten werden mittels GPS bestimmt, sodass man zu jedem Transmitter Varianz- und

Kovarianzinformationen erhält anhand derer das Netz gelagert werden soll. Dabei soll ein genauer Lagerungspunkt ein höheren Einfluss auf die Netzorientierung bekommen als ein Ungenauer. Der Zwang der dadurch auf das Netz ausgeübt wird hängt von dem Verhältnis zwischen den Varianzen der Beobachtungen und den Varianzen der Lagerungspunkte ab. Im Fall des ILT-Systems sind die Varianzen der Beobachtungen (Basislinien) im cm Bereich und die Varianzen der Transmitter im dm bis m Bereich, sodass die Verbesserungen der Basislinien und die damit verbundene Zerstörung der Netzgeometrie, verschwindend gering ist. Die innere Geometrie bleibt dadurch weitestgehend erhalten. Durchgeführt wird die weiche Lagerung durch eine Erweiterung des Ausgleichsmodells:

$$\begin{bmatrix} l \\ l_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v \\ v_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_N & A_A \\ 0 & I_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_N \\ \hat{x}_A \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Wobei A_N die Designmatrix der unbekannt Parameter beschreibt und A_A die Designmatrix der Lagerungspunkte. Die Matrix I_A ist eine Einheitsmatrix dessen Größe der Anzahl der Lagerungskordinaten entspricht. Die stochastischen Informationen werden in der Σ Matrix wie folgt zusammengefasst:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_{ll} & 0 \\ 0 & \Sigma_A \end{bmatrix} \quad P = \Sigma^{-1} \quad (2.39)$$

Die Verbesserungen bestehen aus dem Verbesserungsvektor der Parameter v , welcher bei Erhalt der inneren Geometrie verschwindend klein sein sollte, und dem Verbesserungsvektor der Lagerungspunkte v_A . Die Varianzen der Lagerungspunkte entsprechen exakt den eingeführten stochastischen Vorinformationen.

2.3.6 Gleitender Mittelwert Filter

Der gleitende Mittelwert (Moving Average - MAV) ist eine einfache Methode zur Glättung von hochfrequent rauschenden Messwerten. Die Stärke der Glättung wird durch die Größe des Rahmens w beschrieben. Der Rahmen ist die Anzahl von Messwerten y die zur Berechnung eines Mittelwerts herangezogen werden.

$$\bar{y}_n = \frac{y_{n-w/2} + y_{n-w/2+1} + \dots + y_n + \dots + y_{n+w/2-1} + y_{n+w/2}}{w} \quad (2.40)$$

Ein Beispiel einer solchen Glättung kann aus Abbildung 13 auf Seite 37 entnommen werden. Ein kleiner Nachteil ist, dass man durch die Filterung am Anfang und am Ende der Zeitreihe jeweils den halben Rahmen an Messungen verliert.

2.4 Kalmanfilter

Zur Glättung oder zum Überbrücken von Messausfällen kann auch ein Kalman-Filter eingesetzt werden. Dieser wird im Anschluss der Empfängerpositionsbestimmung durchgeführt (siehe Kapitel 6.2.1 auf Seite 90).

2.4.1 Kalmanfilter

Der Kalman-Filter ist ein Korrektor-Prädiktor Algorithmus zur optimalen Schätzung von zeitlich variablen und somit nicht-stationären stochastischen Prozessen. Durch die Prädiktion aufgrund eines dynamischen Modells ist der Kalman-Filter in der Lage Messlücken zu überbrücken. Verwendet wird der Kalmanfilter im Zusammenhang mit der Lösung der Empfängerposition des ILT-Systems. Dabei können zusätzliche Informationen aus autonomen Sensoren (DR-Module, IMU) in die Lösung der Empfängerposition einfließen. In Abbildung 10 wird der Aufbau des Kalmanfilters beschrieben [Pai07]:

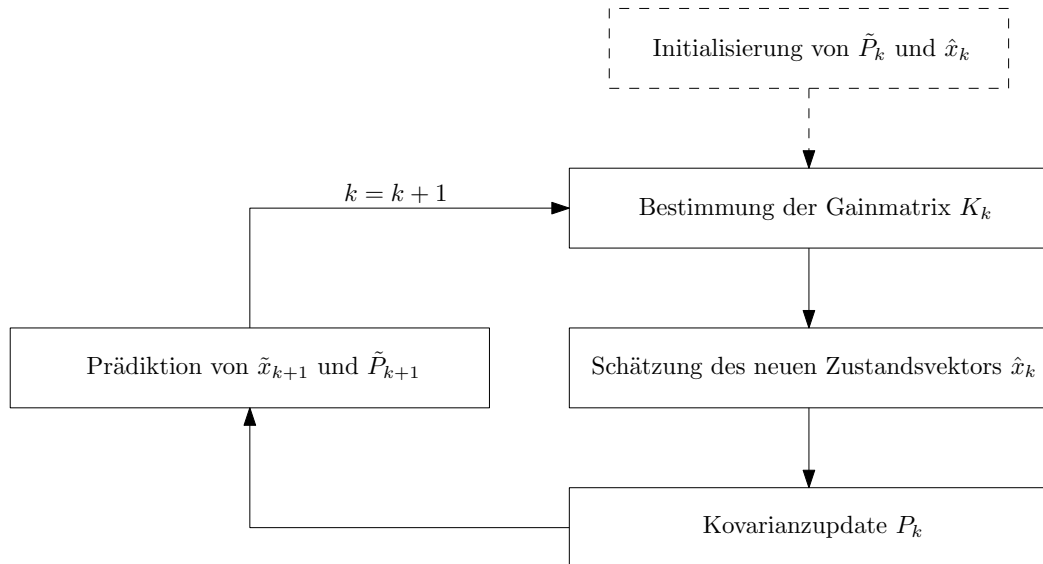


Abbildung 10: Ablauf des Kalmanfilters

1. Bestimmung der Gainmatrix K :

$$K = \tilde{P}_k H_k^T (H_k \tilde{P}_k H_k^T + R)^{-1} \quad (2.41)$$

Mit Hilfe der Designmatrix H_k , der prädizierten Kovarianzmatrix \tilde{P}_k und der Varianzmatrix der Beobachtungen R kann die Kalman-Gainmatrix K_k berechnet werden.

2. Schätzung des neuen Zustandsvektors \hat{x}_k und Kovarianzupdate P_k

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_k + K_k(z_k - H_k\tilde{x}_k) \quad P_k = (I - K_kH_k)\tilde{P}_k \quad (2.42)$$

Zu den prädizierten Statevektor \tilde{x}_k wird die, mit der Gainmatrix gewichtete, Differenz zwischen den Beobachtungen z_k und den prädizierten Beobachtungen $H_k\tilde{x}_k$ addiert.

3. Prädiktion von \tilde{x}_{k+1} und \tilde{P}_{k+1}

$$\tilde{x}_{k+1} = \Phi_k\hat{x}_k \quad \tilde{P}_{k+1} = \Phi_kP_k\Phi_k^T + Q_k \quad (2.43)$$

Mit Hilfe des dynamischen Modells Φ_k und der Kovarianzmatrix des Systemrauschens Q_k können der Statevektor und dessen Kovarianzmatrix für die nächste Epoche prädiziert werden.

2.5 Testareal und Referenzstationen

Folgend werden die verwendeten Testareale samt deren besonderen Eigenschaften erklärt. Es werden auch die bei den Testmessungen verwendeten GPS-Referenzstationen beschrieben.

2.5.1 Testareale

Die Testmessungen in dieser Arbeit wurden in drei verschiedenen Arealen durchgeführt (siehe Abbildung 11). Diese Areale unterscheiden sich in geometrischer Ausdehnung, Bebauungsdichte und Aufbau bzw. Anzahl der Gebäude in den Arealen. Generell befinden sich die Gebäude am EADS - Astrium Gelände in Ottobrunn in der Nähe von München.

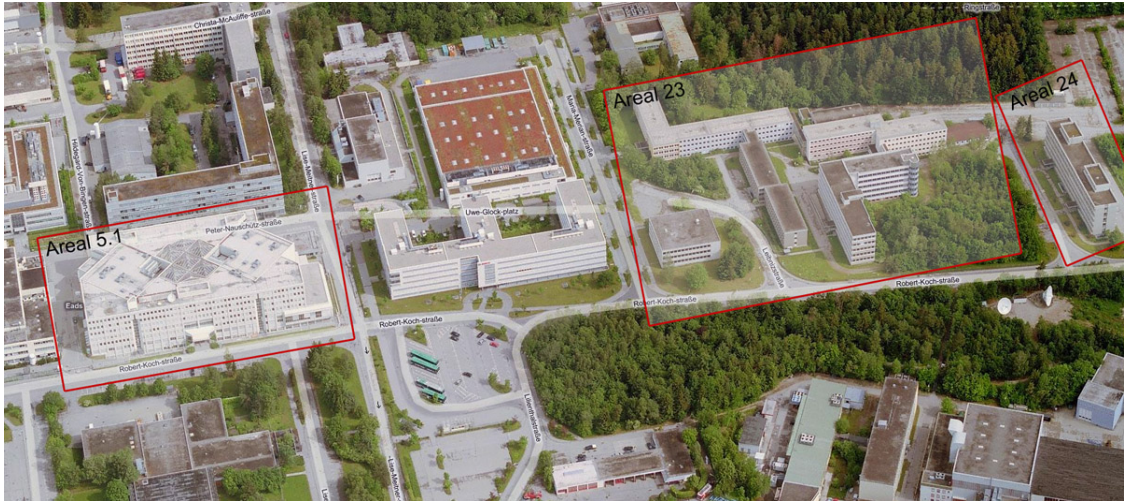


Abbildung 11: Einteilung der Testareale

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

- **Areal 5.1:** Dieses Testgelände beinhaltet das Hauptgebäude der Fa. Astrium am Werks-
gelände. Das Areal ist in etwa 100 m x 150 m groß und schließt im Westen und Norden
knapp an Nachbargebäuden an. Das fünfstöckige Gebäude selbst besteht aus einer massiven
Grundkonstruktion mit größtenteils feuerfesten Stahltüren. Die Büroräume im Inneren des
Gebäudes werden durch Stahl/Aluminium-Wände abgetrennt. Weiters befinden sich in dem
Gebäude mehrere Labore und Reinräume und zahlreiche elektronische Quellen.
- **Areal 23:** Dieses Testgelände besteht aus mehreren unterschiedlich hohen, leerstehenden
Gebäuden. Es ist 140 m x 140 m groß und ist in allen Richtungen gering dicht bebaut. Die
Fensterscheiben der Gebäude sind teilweise beschädigt.
- **Areal 24:** Dies ist das kleinste Testgelände mit 70 m x 50 m. Es besteht aus einem einzelnen
leerstehenden und freistehenden vierstöckigen Gebäude. Die Fensterscheiben sind größtenteils
zerstört und teilweise mit Holzplanken verschlossen. Die bestehenden Fensterscheiben
sind mit einer reflektierende Folie verspiegelt.

2.5.2 Referenzstationen

Zur Evaluierung der Transmitterpositionen wurden in den meisten Fällen Basislinien von den
firmeneigenen Referenzstationen (siehe Abbildung 12) zu den ILT-Transmittern gerechnet. Die
Koordinaten dieser Referenzstationen (siehe Tabelle 7 und 8) wurden mittels SAPOS-Dienst,
IGS Stationen aus Wettzell bzw. Bozen und Einzelpunktlösungen berechnet. Als GPS-Empfänger
wurde ein mobiler Novatel DLV-3 Zweifrequenz-Empfänger verwendet. Die Koordinaten wurden
mit einer Genauigkeit von 5 mm in Lage und Höhe bestimmt.

Tabelle 7: Position der Referenzantenne 1

Antenne 1	X [m]	Y [m]	Z [m]
ETRS89	4183768.240	862855.331	4721234.130
ITRF97	4183767.860	862855.671	4721234.347
	Phi	Lambda	H [m]
WGS84	48° 03' 08.2150"	11° 39' 11.6294"	632.17

Tabelle 8: Position der Referenzantenne 2

Antenne 2	X [m]	Y [m]	Z [m]
ETRS89	4183768.511	862854.717	4721234.257
ITRF97	4183768.132	862855.058	4721234.473
	Phi	Lambda	H [m]
WGS84	48° 03' 08.2144"	11° 39' 11.5978"	632.36

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS



Abbildung 12: Astrium-Referenzantennen

Mit den Referenzstationen wurden u.a. die GPS-Absolutlösungen der Transmitter überprüft und Genauigkeitsangaben abgeleitet.

3 Anforderung an die Transmitterpositionsgenauigkeit

Im folgenden Kapitel soll bestimmt werden wie genau die Position der ILT-Transmitter bekannt sein muss um eine geforderte Empfängergenauigkeit von mindestens 2 Meter zu erhalten. Dabei muss im ersten Schritt die Genauigkeit der Streckenmessung bestimmt werden um daraufhin eine Simulationsrechnung, bei welcher unterschiedliche Transmittergenauigkeiten untersucht werden, durchzuführen

3.1 Empirische Bestimmung der Genauigkeit der Streckenmessung

Um die Streckenmessgenauigkeit zu bestimmen, wurden Messungen durchgeführt, an denen Transmitter- und Empfängerposition hochgenau bekannt waren. Im Gebäude 24 befinden sich koordinativ bekannte Punkte (siehe Abbildung 20 auf Seite 47), auf denen etwa 1 min (1200 Messungen) lang statische Messungen durchgeführt wurden. Um die Epochen miteinander zu vergleichen, wurden TDoA's (Time difference of arrival - Streckendifferenzen) gebildet und mit den Referenzdifferenzen verglichen. Durch die Streckendifferenzen lässt sich der Uhrenfehler δ für jede Epoche t eliminieren und ermöglicht einen Vergleich der Messungen aller Epochen zur Referenz.

$$\rho_i^t - \rho_j^t = (\sqrt{(\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2)^t + \delta^t}) - (\sqrt{(\Delta x_j^2 + \Delta y_j^2)^t + \delta^t}) = \sqrt{(\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2)^t} - \sqrt{(\Delta x_j^2 + \Delta y_j^2)^t} \quad (3.1)$$

Die Ergebnisse für zwei Testpunkte kann man aus folgender Tabelle entnehmen (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9: Streckengenauigkeit TDoA Statisch

	Mittelwert [m]	STD [m]	Median [m]	MAD [m]
Punkt 512	3.81	1.58	3.97	1.39
Punkt 552	8.66	9.46	6.24	4.76

Punkt 552 repräsentiert dabei einen generell schlechter zu bestimmenden Punkt, da sich dieser an einer Stelle mit schlechter Empfangqualität befindet. An der hohen Standardabweichung kann man jedoch erkennen, dass bei der Messung grobe Fehler aufgetreten sind. Deswegen wird sich auf den robusten Median und MAD bezogen. Durch die Mittelung der Mediane beider Punkte kommt man auf eine Streckenmessgenauigkeit von in etwa 5 Meter. Da die Streckenmessgenauigkeit jedoch auch abhängig von der Länge der Strecke ist, wird ein zusätzlicher Faktor von 50000 ppm (parts per million) angebracht. Dieser Wert ist ein Erfahrungswert und kann nicht mathematisch belegt werden, sondern wurde durch Abschätzung bestimmt.

Weiters wurde die Präzision einer kinematischen Messung und deren Korrelation zu den Signal-Rausch-Verhältnis (S/N) untersucht. Da dabei jedoch die Testtrajektorien nicht bekannt sind und die Messungen keine zeitliche Referenz haben kann keine mathematisch korrekte Lösung gerechnet

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

werden. Um trotzdem eine Aussage über die Präzision der kinematischen Messungen zu erhalten wurde folgendes Verfahren angewendet. Eine gemessene Trajektorie wurde mittels MAV-Filter geglättet. Aus den Positionslösungen der gefilterten Trajektorie kann die Strecke zu den Transmittern berechnet werden. Diese gerechneten Strecken können daraufhin mit den gemessenen Strecken verglichen werden (siehe Abbildung 13). Die Differenz zwischen gemessener und gerechneter Strecke ergibt die Präzision.

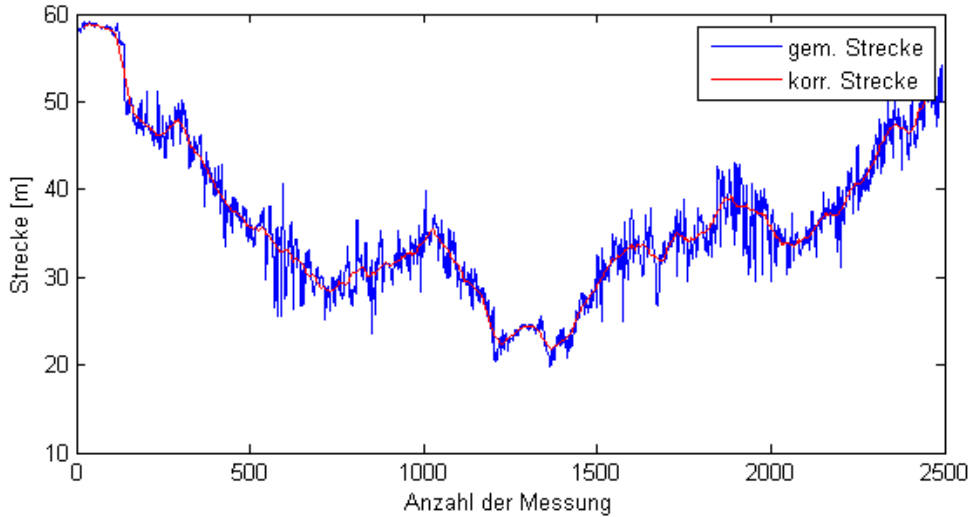


Abbildung 13: Streckenmessung Transmitter 1 - Areal 24

Dabei wurden für die Berechnungen eine Trajektorie im Areal 24 (siehe Abbildung 20 auf Seite 47) mit guter Empfangsqualität und eine Trajektorie in Areal 23 mit schlechter Empfangsqualität gewählt.

Tabelle 10: Streckenpräzision - Areal 24

Transmitter	μ_ρ [m]	σ_ρ [m]	$\mu_{S/N}$ [dB]	$\sigma_{S/N}$ [dB]	$Median_\rho$ [m]	MAD_ρ [m]
1	-0.56	2.30	23.80	4.94	-0.46	1.82
2	0.50	2.22	27.81	4.60	0.57	1.72
3	1.12	2.43	17.02	7.51	1.26	1.89
4	-2.73	2.17	21.62	9.59	0.63	1.65
5	0.42	2.33	16.01	4.40	0.51	1.74
6	1.34	1.93	22.40	4.82	1.45	1.48
7	-0.78	2.11	32.24	4.67	-0.56	1.72
8	-0.30	2.42	24.41	5.94	-0.03	1.88

Bei den Streckenmessungen im Areal 24 (siehe Tabelle 10) erkennt man die hohe Empfangsstär-

**Hochgenaue ad-hoc
Positionsbestimmung mit GNSS**

ke durch durchgehend hohe S/N-Werte. Um nicht durch Ausreißer verfälschte Werte zu erhalten werden Median und MAD zur Analyse herangezogen.

Tabelle 11: Streckenpräzision - Areal 23

Transmitter	μ_ρ [m]	σ_ρ [m]	$\mu_{S/N}$ [dB]	$\sigma_{S/N}$ [dB]	$Median_\rho$ [m]	MAD_ρ [m]
1	0.52	4.08	5.83	3.60	1.23	3.08
2	-0.41	3.14	10.64	3.85	-0.51	2.49
3	0.08	2.82	19.51	8.56	0.45	2.02
4	-0.70	3.04	23.43	8.48	-0.48	2.17
5	-1.49	3.80	15.35	5.01	-1.61	3.04
6	1.44	3.67	18.81	6.15	1.92	2.49
7	-1.59	4.45	19.45	11.67	-1.41	3.15
8	-1.32	4.56	6.80	3.38	-2.02	3.25

Im Gegensatz zu Areal 24 erkennt man in Areal 23 (siehe Tabelle 11) deutlich geringere S/N-Werte und größere MAD-Werte. An Transmitter 1 und Transmitter 8 kann man erkennen, dass für niedrige S/N-Werte ($< 7\text{dB}$) es zu einer Verschlechterung der Streckenmessung und einer größeren Häufigkeit von groben Fehlern kommt. Weiters kann man durch eine Mittelwertbildung der MAD-Werte aus Areal 24 und 23 eine Präzision der kinematischen Streckenmessungen von 2.5 Meter berechnen.

3.2 Ableitung der Genauigkeitsanforderungen der Transmitterpositionen

Nachdem die Genauigkeiten der Streckenmessung bestimmt wurden wird eine Simulationsrechnung durchgeführt. Diese soll die Korrelation zwischen den Transmittergenauigkeiten bzw. Streckenmessgenauigkeiten und Empfängergerauigkeiten zeigen.

3.2.1 Simulationsrechnung

Um den funktionalen Zusammenhang und die Korrelation zu berechnen, wird das Varianzfortpflanzungsgesetz angewendet. Dabei wird sich auf den zweidimensionalen Fall bezogen, da die Höhe ausschließlich aus den Luftdruckmessungen bestimmt wird. Dazu folgender funktionale Zusammenhang:

$$\rho_{ik}^j = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} + \delta^j \quad (3.2)$$

Die Pseudostrecke ρ ist abhängig von der Epoche j , dem Transmitter i und dem Empfänger k . Erkennbar ist dabei, dass für jede Epoche ein neuer Uhrenfehler δ geschätzt werden muss. Eine Epoche besteht bei 8 Transmittern aus 8 Pseudostrecken. Um auch den Transmitterkoordinaten

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

in der Simulation stochastische Informationen zu geben wird eine weiche Lagerung simuliert. Somit erhält man folgenden Zusammenhang:

$$\begin{bmatrix} l \\ l_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v \\ v_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_N & A_A \\ 0 & I_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_N \\ \hat{x}_A \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Da der funktionale Zusammenhang ein nicht-linearer Zusammenhang ist, erfordert dieser und die weiche Lagerung selber eine Linearisierung. Man erhält folgende Matrizen:

$$A_N = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_{1k}^1}{\partial x_k} & \frac{\partial \rho_{1k}^1}{\partial y_k} & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \rho_{ik}^j}{\partial x_k} & \frac{\partial \rho_{ik}^j}{\partial y_k} & \dots & \dots & \frac{\partial \rho_{ik}^j}{\partial \delta t^j} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Die Designmatrix A_N beschränkt sich auf den funktionalen Zusammenhang zwischen den Messungen und den Positionslösungen bzw. A_A auf die Lagerungspunkte, in diesem Fall die Transmitterpositionen.

$$A_A = \begin{bmatrix} -\frac{\partial \rho_{1k}^1}{\partial x_k} & -\frac{\partial \rho_{1k}^1}{\partial y_k} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & -\frac{\partial \rho_{ik}^j}{\partial x_k} & -\frac{\partial \rho_{ik}^j}{\partial y_k} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Daraufhin kann die Normalgleichungsmatrix und daraus die Kofaktorenmatrix der Parameter berechnet werden. Die stochastischen Informationen der Streckenmessung stecken in Σ_{ll} und der Transmitter in Σ_A .

$$N = \begin{bmatrix} A_N & A_A \\ 0 & I_A \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Sigma_{ll} & 0 \\ 0 & \Sigma_A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_N & A_A \\ 0 & I_A \end{bmatrix} \quad Q_{xx} = N^{-1} \quad (3.6)$$

Aus der Kofaktorenmatrix Q_{xx} können die Genauigkeitsinformationen sowie die Parameter der Fehlerellipse für eine bestimmte Empfängerposition abgeleitet werden (siehe Kapitel 2.3.4 auf Seite 27). Um jedoch ein gutes Bild über die Genauigkeiten in einem Gebiet zu erhalten, wird ein Raster über das ganze Gebiet gerechnet. Zur Veranschaulichung und zum einfachen und schnellen Testen verschiedener Einstellungen wurde eine interaktive graphische Benutzeroberfläche in MATLAB erstellt. Dieses kleine Programm gibt visuell die simulierte Lagegenauigkeit über das ganze Areal in Pseudofarben aus. Zusätzlich kann man sich für einen wählbaren Punkt, Standardabweichung, Parameter und Form der Fehlerellipse ausgeben lassen (siehe Abbildung 14). Weiters können Ausfälle von bestimmten Transmitter und deren Auswirkungen auf das Gebiet simuliert werden.

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

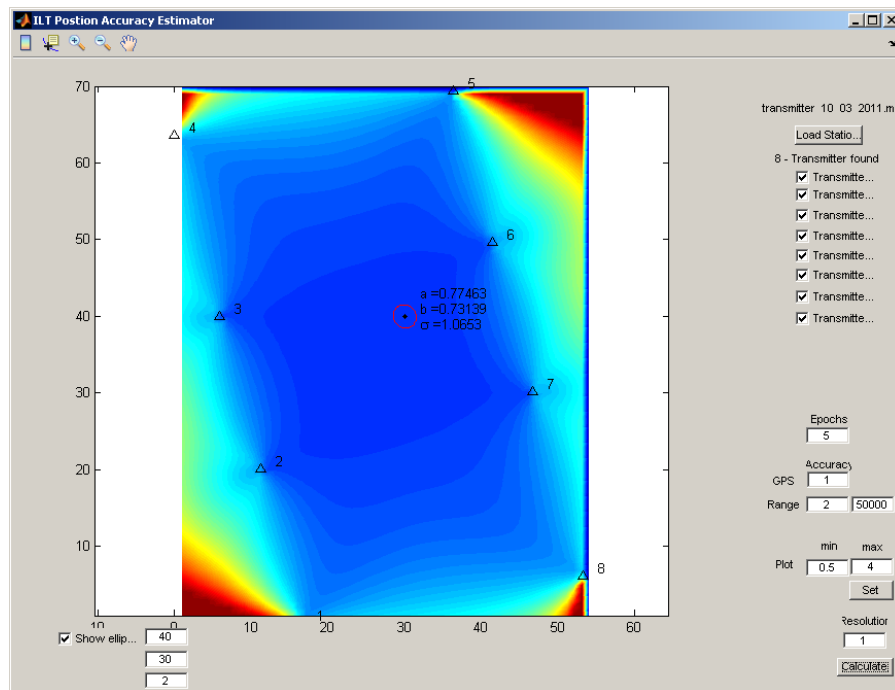


Abbildung 14: ILT Position Accuracy Estimator

3.2.2 Geometrie

Es ist zu erkennen, dass die Genauigkeiten zu einem großen Teil von der Geometrie der Transmitter zum Empfänger abhängen. Die "Line of Position" (LOP) einer Streckenmessung ist ein Kreis. Bei einer Streckenmessung spielt die Geometrie eine große Rolle, da schleifende Schnitte zu dem Fall führen, dass sich kleine Fehler in der Streckenmessung sehr stark auf die Positionslösung auswirken. Bei einer guten Geometrie (siehe Abbildung 15) ist der Schnittpunkt gut zu erkennen und kleine Fehler würden sich hier auch nur gering auswirken.

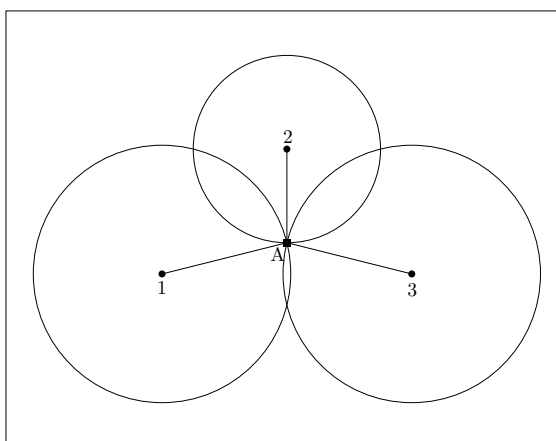


Abbildung 15: LOP - Gute Geometrie

Bei einer schlechten Geometrie (siehe Abbildung 16) fällt es durch einen schleifenden Schnitt schwerer den richtigen Punkt zu finden. Ein kleiner Fehler führt in diesem Fall zu einer großen Verfälschung der Position.

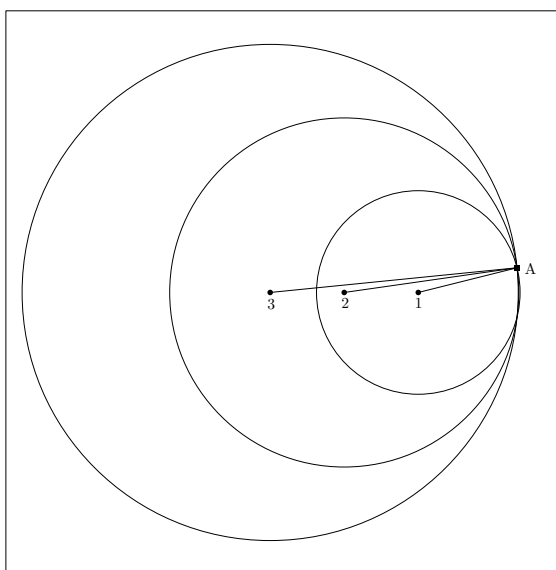


Abbildung 16: LOP - Schlechte Geometrie

3.2.3 Ergebnisse

Nachdem die Streckengenauigkeiten geschätzt wurden, kann die Simulation für unterschiedliche Transmittergeometrien durchgeführt werden. Verwendet wird das bereits vorher vorgestellte Simulationsprogramm (siehe Abbildung 14). Um die Glättung durch den aktuellen Positionsal-

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

gorithmus zu berücksichtigen, wird auch hier eine Glättung bzw. ein Ausgleich über 20 Epochen durchgeführt. Untersucht werden dabei folgende Transmittergenauigkeiten (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Genauigkeit der Transmitterpositionen

Methode	Genauigkeit [m]
DGPS	0.1
L1/L2 Absolut	1
L1 Absolut	3
Code Absolut	5

Als Testpunkte wurden repräsentative Punkte im Areal 24 gewählt (siehe Abbildung 17).

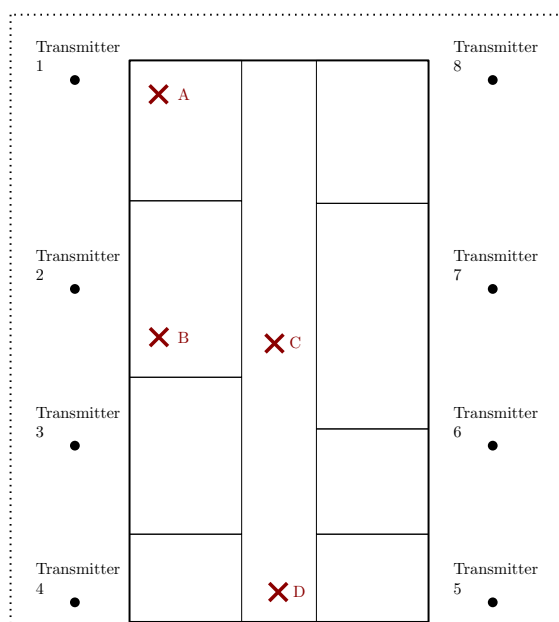


Abbildung 17: Testpunkte im Areal 24

Als Ergebnis werden die Standardabweichung σ und die kleine bzw. große Halbachse (b bzw. a) der Fehlerellipse im Testpunkt gezeigt. Als Streckenmessgenauigkeit wurden die ermittelten 5 Meter + 50000 ppm verwendet. Die Ergebnisse für die Testpunkte können aus Tabelle 13 entnommen werden.

Tabelle 13: Empfänger Genauigkeit für die Testpunkte in Areal 24

DGPS	A	B	C	D
σ [m]	1.05	0.86	0.83	1.13
a [m]	0.82	0.66	0.60	0.93
b [m]	0.67	0.55	0.58	0.64
L1/L2	A	B	C	D
σ [m]	1.39	1.13	1.10	1.48
a [m]	1.07	0.87	0.78	1.22
b [m]	0.88	0.72	0.75	0.84
L1	A	B	C	D
σ [m]	2.90	2.36	2.27	3.10
a [m]	2.22	1.82	1.62	2.54
b [m]	1.86	1.51	1.59	1.76
Code	A	B	C	D
σ [m]	4.62	3.77	3.63	4.93
a [m]	3.53	2.90	2.60	4.05
b [m]	2.98	2.41	2.54	2.81

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass eine GPS-Genauigkeit von 3 Metern oder mehr zu Empfängerpositionsfehler führt, welche jenseits der 2 Meter Marke sind. Somit muss man auf jedenfall die Transmitterposition genauer als 3 Meter bestimmen um die geforderte Genauigkeit erreichen zu können. Der Unterschied in dem Empfängerkoordinaten zwischen DGPS und L1/L2 ist sehr gering und kann somit gleichgesetzt werden. Die Unterschiede der Genauigkeit durch die Geometrie sind bei den Testpunkten geringfügig zu erkennen.

3.3 Empirische Überprüfung der Simulation

Um die Auswirkungen von unterschiedlichen GPS-Positionsgenauigkeiten zusätzlich zu überprüfen, wurden die Transmitterkoordinaten bei der Auswertung absichtlich um konstante Abweichungen in zufällige Richtungen verfälscht. Damit kann man den Effekt von ungenauen GPS-Positionen und deren Auswirkung im Positionsberechnungsalgorithmus zeigen. Überprüft wurden eine statische und eine kinematische Messung im Areal 24.

3.3.1 Statische Messung

Bei der statischen Messung wurde eine Messung zum Überprüfungspunkt 512 (siehe Abbildung 20 auf Seite 47) verwendet und im ersten Schritt mit unverfälschten Transmitterkoordinaten berechnet (blauer Punkt). Mit diesem Punkt werden die Empfängerpositionslösungen der verfälschten Transmitter verglichen.

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

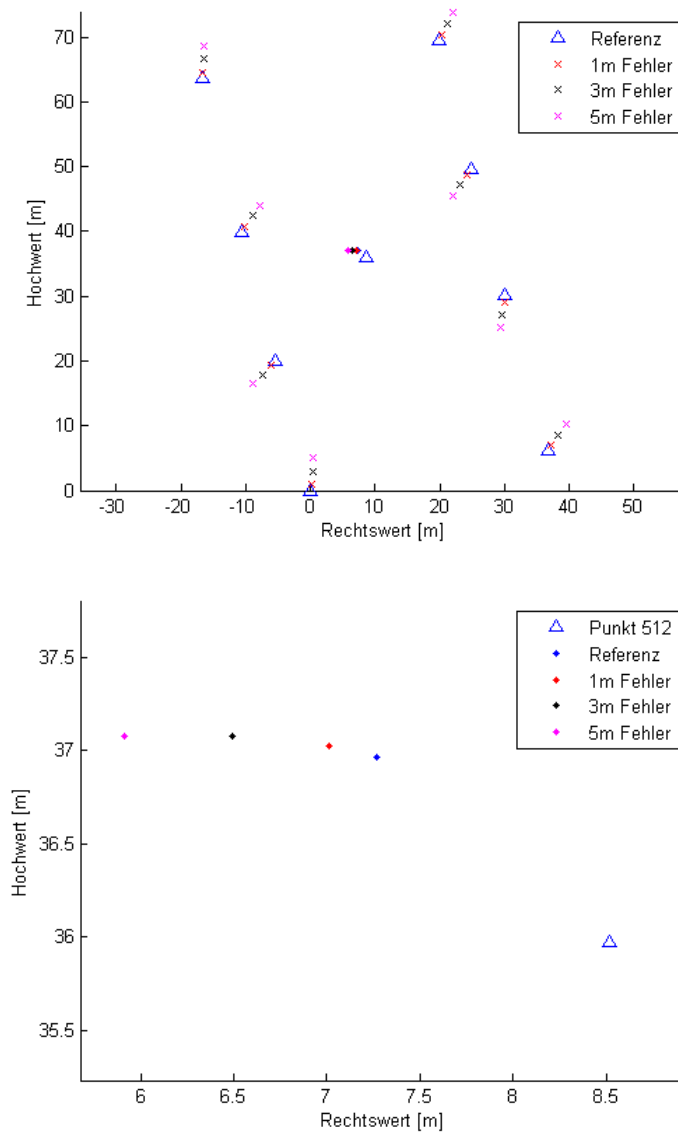


Abbildung 18: Abweichungen der statischen Messung

In Abbildung 18 kann man erkennen, dass bereits der Punkt mit unverfälschten Transmitterkoordinaten stark von der wahren Position abweicht. Dies entsteht durch Messfehler und die Ungenauigkeit der Streckenmessung. Von Interesse ist jedoch wie stark sich die Empfängerposition bei der Verfälschung der Transmitterkoordinaten verschlechtert. Die Simulation weicht hierbei etwas von der realen Messung (siehe Tabelle 14) ab. Jedoch kann man die Aussage tätigen, dass bei Simulation wie bei der Messung die Empfängerpositionsgenauigkeit bei 3 Meter GPS-Genauigkeit größer als 2 Meter und somit inakzeptabel ist.

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

Tabelle 14: Streckenpräzision - Areal 23

GPS-Genauigkeit [m]	0.1	1	3	5
Messung				
Abs. Fehler [m]	1.60	1.83	2.30	2.82
Rel. Fehler [m]	0	0.26	0.78	1.36
Simulation				
Abs. Fehler [m]	0.83	1.10	2.36	3.77
Rel. Fehler [m]	0	0.27	1.44	2.80

3.3.2 Kinematische Messung

Bei der kinematischen Messung kann durch das fehlende Zeiterfassungssystem die gemessene Trajektorie nicht mit der wahren Trajektorie verglichen werden. Es kann jedoch der Vergleich der Trajektorien bei unterschiedlichen GPS-Genauigkeiten durchgeführt werden. Bei der gewählten Trajektorie (siehe Abbildung 20 auf Seite 47) kommt es durch Verschlechterung der Transmitterkoordinaten im Vergleich zur statischen Messung zusätzlich zu einem Genauigkeitseinfluss durch die sich verändernde Geometrie (siehe Abbildung 19).

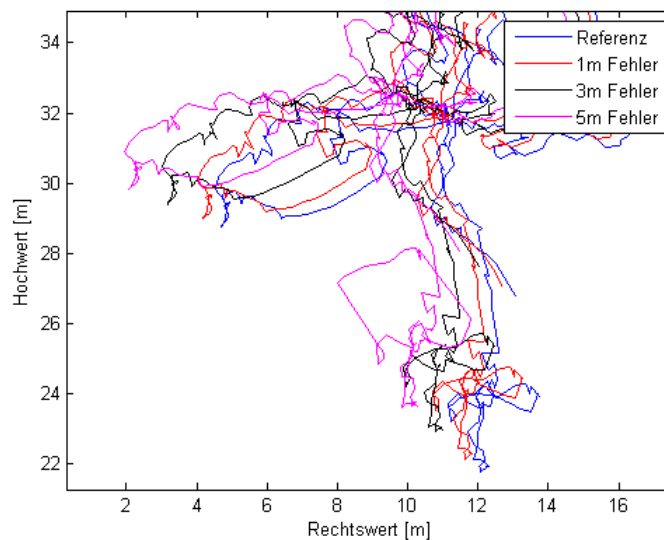


Abbildung 19: Abweichungen der kinematischen Messung

Die Ergebnisse (siehe Tabelle 15) bestätigen die Resultate der Simulationsrechnung. Somit kann man sagen, dass die Transmitterpositionen auf keinen Fall ungenauer als 3 Meter sein dürfen, wobei jedoch eine Genauigkeit von 1 Meter bereits ausreichend wäre.

**Hochgenaue ad-hoc
Positionsbestimmung mit GNSS**

Tabelle 15: Streckenpräzision - Areal 23

GPS-Genauigkeit [m]	1	3	5
Messung			
Min. rel. Fehler [m]	0.23	0.70	1.19
Max. rel. Fehler [m]	0.68	1.91	5.05
Mittlerer Fehler [m]	0.46	1.31	3.12
Simulation			
Rel. Fehler [m]	0.27	1.44	2.80

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

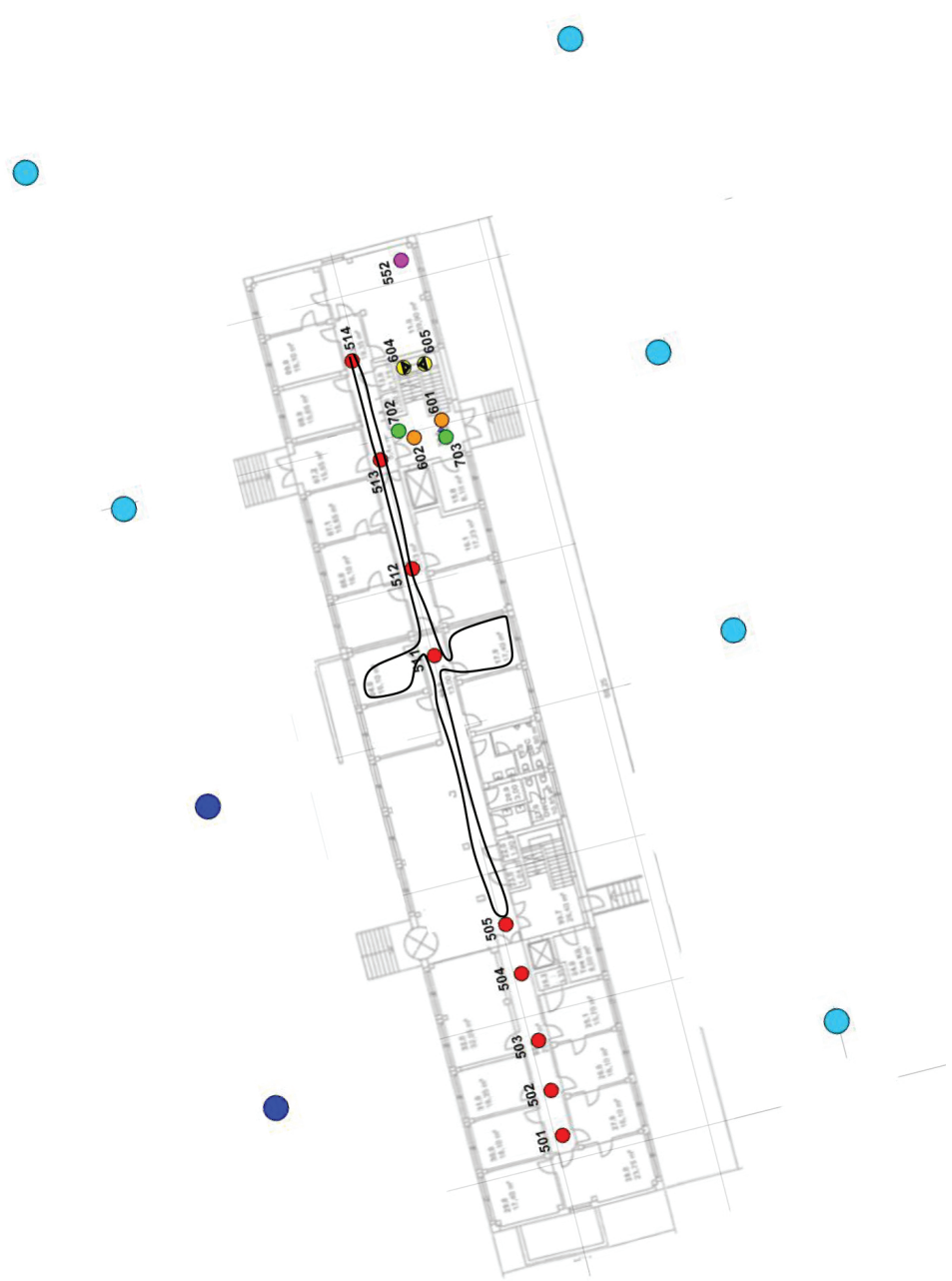


Abbildung 20: Punktskizze des Areals 24

4 Positionierung der Sendestationen

Nachdem im vorherigen Kapitel die benötigte Genauigkeit der Transmitterpositionen bestimmt wurde, beschäftigt sich das folgende Kapitel mit den unterschiedlichen Möglichkeiten die Transmitterpositionen zu berechnen. Dabei ist die Untersuchung durch folgende Aspekte beeinflusst:

- Genauigkeit bzw. Präzision der Transmitterposition im Bezug auf die absolute Genauigkeit entsprechend der Anforderungen
- Zeit - schnellstmögliche Positionsbestimmung
- Kosten - möglichst günstiges Equipment
- Benutzung alternativer Messtechniken zur Bestimmung der Transmitterposition

4.1 Überblick

Um die folgenden Punkte zu verstehen, wird im ersten Schritt der aktuelle Ansatz zur Positionierung der Transmitter erklärt (siehe Abbildung 21)

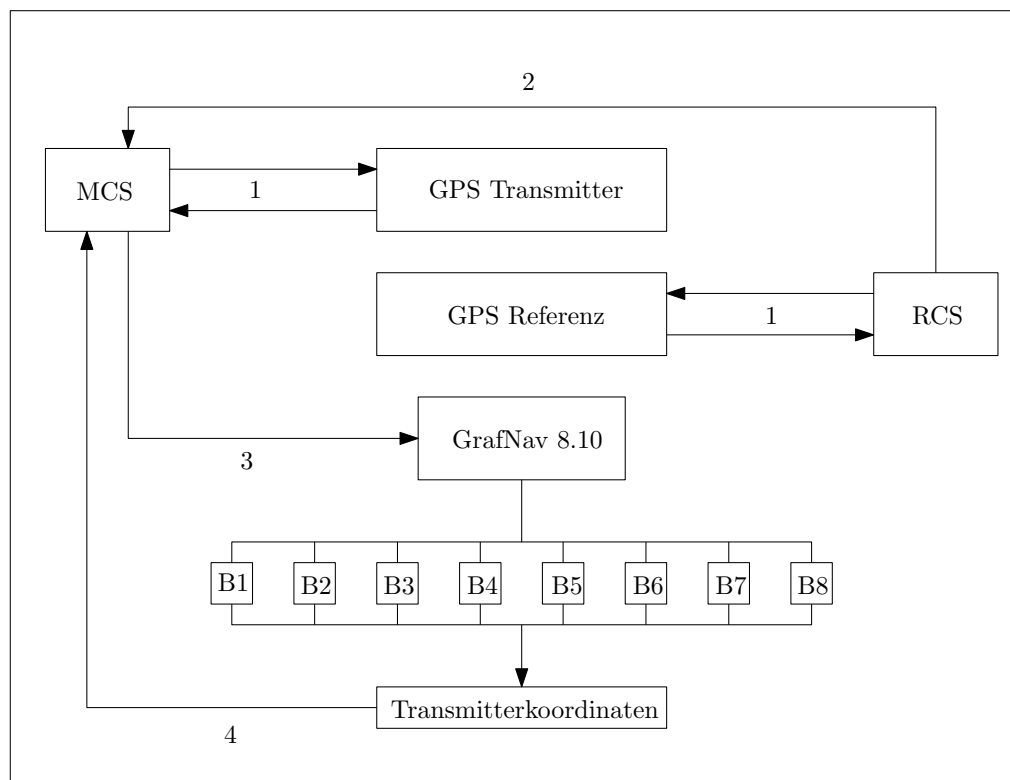


Abbildung 21: Aktueller Ansatz zur Positionierung

1. Die MCS gibt den Befehl zum Start der GPS-Aufzeichnung an alle Transmitter. Nach Beendigung der Aufzeichnung werden alle GPS-Daten an die MCS geschickt. Zur gleichen Zeit muss die Referenz-Kontrollstation (RCS) die GPS-Daten einer bekannten Referenzposition aufzeichnen. Die RCS kann in diesem Fall eine eigenen GPS-Referenzstation, welche auf einem koordinativ bekannten Punkt steht oder eine Referenzstation des SAPOS- oder ASCOS-Dienst sein.
2. Die GPS-Daten und Stationskoordinaten der RCS müssen an die MCS übertragen werden. Bei einer eigenen Referenzstation kann dies gleich im Anschluss der Messungen passieren. Bei SAPOS nach Veröffentlichung der Daten. Für Echtzeit-SAPOS-Dienste wird eine zusätzliche Datenverbindung (z.B. GSM) zur SAPOS-Zentrale benötigt.
3. Auf der MCS werden die GPS-Daten der Referenz und die GPS-Daten der Transmitter mittels der Waypoint 8.10 - GravNav Software verarbeitet. Der Benutzer konvertiert mit GravNav die binären GPS-Dateien in das interne Dateiformat und rechnet Basislinien von der Referenz zu allen Transmittern.
4. Die Empfängerpositionen aus den Basislinienberechnungen müssen mit geeigneter Formattierung in einer Textdatei gespeichert werden, damit diese Koordinatendatei in den Positionsberechnungsalgorithmus integriert werden kann.

Der Nachteil des aktuellen Ansatzes ist die Abhängigkeit von einer bekannten Referenzstation bzw. von Referenzdiensten (SAPOS) und somit auch die schlechte Echtzeitperformance. Weiters ist der technische Aufwand des Ablaufes durch selbstständige GPS-Auswertung für Ungeschulte schwierig.

4.2 Neuer Ansatz zur Positionierung der Transmitter

Mit dem neuen Ansatz sollen die Abhängigkeit von Referenzstationen bzw. Referenzdiensten eliminiert werden und somit dem System eine weltweite Echtzeitperformance garantieren, welche die Genauigkeitskriterien erfüllt. Die Berechnung kann grob in die stand-alone Positionierung und die Basislinienberechnung unterteilt werden.

4.2.1 Stand-alone Positionierung mittels GPS

Bei der stand-alone Positionierung mittels GPS unterscheiden sich die Absolutgenauigkeiten durch die Art der verwendeten Empfänger. Der GPS-Standard gibt eine Genauigkeit von 9 m (95%) für die horizontale und 15 m (95%) für die vertikale Komponente bei der Codemessung an [Dep08].

Durch die Verwendung von Einfrequenz-Empfängern kann das Rauschen des Codes reduziert werden. Bei Zweifrequenz-Empfängern lässt sich durch die Kombination der Frequenzen zusätzlich der Einfluss der Ionosphäre, dank ihrer dispersiven Eigenschaft, reduzieren (siehe Tabelle 16).

**Hochgenaue ad-hoc
Positionsbestimmung mit GNSS**

Tabelle 16: Genauigkeit und Kosten von GPS-Empfängern

Fehlerquelle	GPS Code [m]	GPS L1 [m]	GPS L1/L2 [m]
Ephemeriden Daten	2.1	2.1	2.1
Satelliten Uhr	2.1	2.1	2.1
Ionosphäre	4.0	4.0	0.1
Troposphäre	0.7	0.7	0.7
Mehrwegeffekt	1.4	1.4	1.4
Empfänger Messung	7.2	0.5	0.5
Messfehler	9.0	5.3	3.4
Modell	uBlox Antaris 4	Novatel Flexpak SS2 + Antenne	Novatel DLV4 + Antenne
Kosten in €	150	800	7500

Für militärische Nutzer besteht die Möglichkeit des Precise Positioning Service mittels verschlüsselten im P/Y - Code, welcher u.a. präziser und resistenter gegen Störungen bzw. Verfälschungen ist. Novatel-Empfänger geben zusätzlich zu den GPS-Rohdaten auch **Bestpos**-Lösungen aus. Diese Lösungen sind das Ergebnis einer Filterung und Qualitätskontrolle und repräsentieren die genauesten Messungen der Messepoche.

Wie aus Tabelle 16 hervorgeht sind die Messfehler der GPS-Empfänger wesentlich höher als die Anforderungen an die Transmitterpositionsgenauigkeit. Es werden zusätzliche Informationen in Form von Basislinien zwischen den Empfängern benötigt. Hierbei gibt es unterschiedliche Ansätze bei der Gestaltung eines solchen Netzes.

4.2.2 Netzgeometrien bei der Basislinienberechnung

Die Funktionsweise und Definition von Basislinien wurde bereits im Kapitel 2.2.4 auf Seite 18 erklärt. Im folgenden geht es um die verschiedenen Netzgeometrien die für das ILT-System zur Debatte stehen.

- **BESTPOS + Basislinien-Stern:** Der Stern stellt die minimale Konfiguration der Basislinienberechnung dar, da die geringste Anzahl an Basislinien berechnet werden muss. Es werden vom Haupttransmitter (Punkt mit den genauesten Bestpos-Positionen) Basislinien zu allen anderen Transmitter gebildet (siehe Abbildung 22). Dadurch erhält der Haupttransmitter indirektein höheres Gewicht und somit einen höheren Einfluss. Ein Fehler in dieser Position wirkt sich stark auf alle anderen Positionen aus.

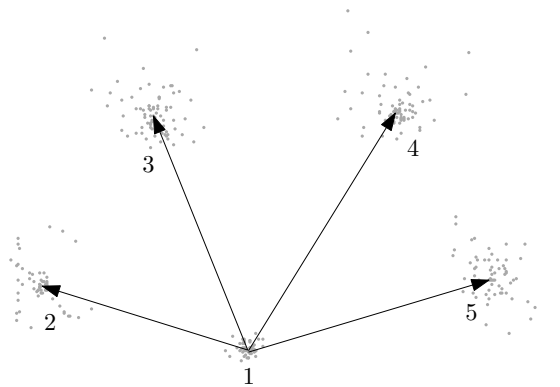


Abbildung 22: Basislinien-Stern

- **BESTPOS + Basislinien-Ring:** Bei dem Verfahren des Basislinien-Ringes bildet jeder Transmitter mit seinem Nachbarn eine Basislinie und ist somit ein Teil eines Ringes (siehe Abbildung 24). Vorteil dieser Methode im Vergleich zum Stern ist, dass benachbarte Transmitter eher gleiche Satelliten sehen als gegenüberstehende (siehe Abbildung 23). Die Beobachtung der gleichen Satelliten zur gleichen Zeit ist die Grundvoraussetzung für eine Basislinienberechnung.

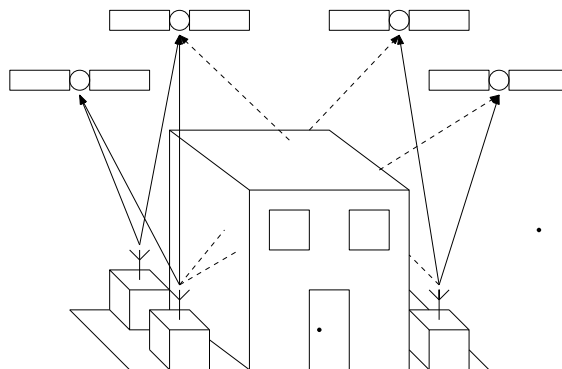


Abbildung 23: Basislinien-Ring Systemskizze

Durch die geringe Redundanz wirken sich grobe Fehler in den Basislinien stark in den Transmitterkoordinaten aus. Im Vergleich zum Stern haben alle Transmitter gleich starken Einfluss auf das Resultat. Die Summe aller Basislinien im Ring sollte Null ergeben. Damit kann überprüft werden ob grob fehlerhafte Basislinien vorhanden sind. Durch die fehlende Redundanz kann jedoch keine Basislinie entfernt werden.

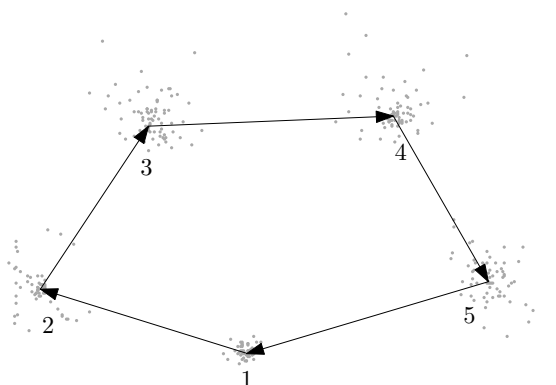


Abbildung 24: Basislinien-Ring

- **BESTPOS + Basislinien-Gesamtnetz:** Das Basislinien-Gesamtnetz (siehe Abbildung 25) ist der robusteste Ansatz. Grobe Fehler können aufgedeckt werden und das Fehlen von bestimmten Basislinien wirkt sich durch die Überbestimmung wenig aus. Der Berechnungsaufwand ist hierbei jedoch der GröÖte, da alle möglichen Basislinien (bei 8 Transmitter - 28 Stück) berechnet werden. Durch die Aufdeckung von Ausreißern und deren Elimination kann die Genauigkeit zusätzlich erhöht werden. Bei einer Berechnungszeit von in etwa 5 Sekunden pro Basislinie beträgt der Berechnungszeitraum in etwa 2.5 Minuten.

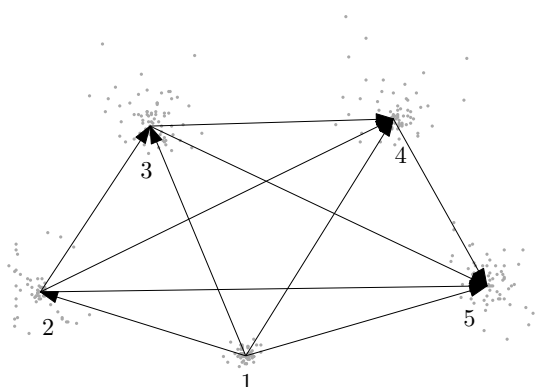


Abbildung 25: Basislinien-Gesamtnetz

- **Verwendung zusätzlicher Streckeninformation:** Hochgenaue zusätzliche Streckenmessungen könnten aus dem Symeo-Sync-System (siehe 2.1.2 auf Seite 11) entnommen werden. Dadurch können Fehler, welche durch fehlerhafte oder fehlende Basislinien entstehen, reduziert werden. In der Ausgleichung werden die Symeo-Streckenmessungen als Beobachtungen eingeführt und mit einer geringen Varianz (1 mm) versehen. Somit werden die Symeo-Strecken als unveränderlich angenommen. Die Symeo-Streckenmessung kann alternativ die

Basislinienberechnung komplett ersetzen.

4.3 Reduzierung der Beobachtungszeit

Aktuell wird bei der Positionierung der Transmitter eine GPS-Beobachtungsdauer von 15 min verwendet. Da jedoch das ILT-System ohne die koordinativ bestimmten Transmitterpositionen nicht einsatzbereit ist, ist es das Ziel die Beobachtungszeit zu verkürzen. Generell kann man sagen: Je länger die Beobachtung, desto höher die Genauigkeit. Unterscheiden muss man hierbei zwischen den absoluten Messungen (Bestpos) und der Basislinienberechnung. Folgende Punkte bestimmen die benötigte Dauer einer Aufzeichnung und deren zeitliche Veränderung.

- **Initialisierung:** Die Initialisierung beschreibt die Zeit vom Einschalten des Empfängers bis zur ersten Positionslösung. In dieser Zeit lädt der Empfänger den benötigte Almanach und die Ephemeriden Daten. Die Dauer der Initialisierung hängt vom Empfänger selbst und von der Art des Starts ab (siehe Tabelle 17).

Tabelle 17: Initialisierungsarten

	Dauer Standard	Dauer Novatel	Grund
Kaltstart	12,5 min	50 sek	Ephemeriden und Almanach sind nicht bekannt oder veraltet. Position und Uhrzeit ist nicht bekannt.
Warmstart	45sek	40 sek	Ephemeriden sind veraltet. Position und Uhrzeit sind bekannt. Letzte Positionsbestimmung länger als 6h her.
Heißstart	15sek	30 sek	Ephemeriden und Almanach sind aktuell. Position und Uhrzeit bekannt. Letzte Positionsbestimmung innerhalb von 2-6h

Dabei unterscheiden sich die Herstellerangaben von den offiziellen Angaben oft. Jedoch sollten die Kaltstartangaben von Novatel sehr kritisch beobachtet werden, da das vollständige Datensignal 37.5 kbit groß ist und mit einer Datengeschwindigkeit von 50 bit/s übertragen wird. Dies sind 25 Blöcke (frames) welche je 1.5 kbit lang sind und somit je 30 Sekunden zur Übertragung benötigen (siehe Abbildung 26). Aus Datengröße und Übertragungsgeschwindigkeit ergibt sich somit eine Downloadzeit von 12.5 Minuten.

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

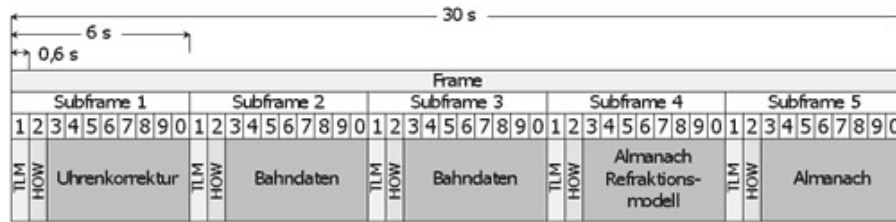


Abbildung 26: Struktur der GPS-Navigationsdaten [Kow09a]

- Basislinienberechnung:** Ziel der Basislinienberechnung ist es die Ambiguitäten ganzzahlig zu fixieren. Gelingt dies, erreicht man hohe Genauigkeiten. Bei zu kurzer Beobachtungsdauer besteht die Möglichkeit dezimale Ambiguitäten (float) zu lösen, mit denen Genauigkeiten im Dezimeterbereich erreicht werden können. Ist die Beobachtungsdauer auch für die float-Lösungen zu kurz erhält man keine Lösung.

Tabelle 18: Beobachtungsdauer und Genauigkeit von relativer Positionierung [HWLW08]

Art des Empfänger	Beobachtungsdauer statisch
Einfrequenz - Empfänger	20min + 2min/km
Zweifrequenz - Empfänger	10min + 1min/km
Messmethode	Horizontale Genauigkeit
statisch	5mm + 0.5 ppm der Basislinie

Die Beobachtungsdauer in Tabelle 18 ist für 4 Satelliten angegeben. Durch jeden zusätzlichen gemeinsamen Satelliten verringert sich die Beobachtungszeit zum Fixieren der Ambiguitäten um 20%. Novatel gibt als ungefähre Abschätzung der Beobachtungsdauer für Zweifrequenz-Empfänger folgende Formel an:

$$Dauer = 60s + 90s/10km \quad (4.1)$$

Somit erhält man für das Lösen von kurzen Basislinien eine Zeit von mindestens 150 Sekunden bei Zweifrequenz-Empfängern. Weiters kann die Abhängigkeit von der Anzahl der verfügbaren Satelliten aus Tabelle 19 entnommen werden. Die Tabelle zeigt, dass besonders bei kurzer Messdauer Zweifrequenz-Empfänger eine wesentlich bessere Performance haben.

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

Tabelle 19: Mindestbeobachtungszeiten

Basislinienlänge (km)	Empfohlene Mindestbeobachtungsdauer					
	4 Satelliten		5 Satelliten		>5 Satelliten	
	L1	L1/L2	L1	L1/L2	L1	L1/L2
1-10km	60 min	20 min	36 min	12 min	24 min	8 min

- **Absolutlösungen:** Je mehr Lösungen zur Verfügung stehen desto besser und robuster können Mittelwert und Standardabweichung bestimmt werden. Dies ist besonders wichtig, da die Basislinien ihren absoluten Bezug und dessen Varianz durch die Bestpos Lösungen bekommen.

4.4 Berechnungssoftware

Die Berechnung der Transmitterpositionen wird automatisch durchgeführt und benötigt keinerlei fachliches Wissen. Die verschiedenen Berechnungsarten können zu Beginn der Berechnung ausgewählt werden. Als Ergebnis erhält man die Transmitterpositionen in geographischen WGS84 Koordinaten. Die Programme `wconvert.exe` und `CallGPS.exe` sind dabei ein Teil des Novatel Waypoint 8.10 Development Kits. In Abbildung 27 wird die Struktur der Berechnungssoftware beschrieben:

- **wconvert.exe:** Teil der Waypoint-Software, konvertiert GPS-Rohdaten in das Waypoint (.gbp) Format. Erstellt eine Bestpos-Trajektorie (.fsp).
- **GPScalc.exe:** Berechnet aus den Bestpos-Trajektorien die Standardabweichung und Mittelwert für jeden Transmitter und schreibt die Werte in die entsprechenden .pos Dateien.
- **findBestPos.exe:** Untersucht die Genauigkeiten der .pos Dateien und erstellt eine Koordinatenliste (coordList.txt) der Transmitter. An erster Stelle steht dabei die Master-Station (Transmitter mit geringster Höhenstandardabweichung).
- **writeWPCfg.exe:** Schreibt Waypoint-Konfigurationsdateien (.cfg) für jede benötigte Basislinie. Hier wird auch über die Art der Basislinien - Geometrie entschieden.
- **CallGPS.exe:** Teil der Waypoint-Software, welche die Berechnung der Basislinie aus den GPS-Daten durchführt. Man erhält unter anderem auch eine .fss - Datei pro Basislinie, in welcher der Basislinienvektor und die dazugehörige Varianz - Kovarianz Information steht.
- **qControl.exe:** Untersucht alle .fss -Dateien nach Fehlermeldungen und entfernt unbrauchbare Basislinien.

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

- **estimatePos.exe**: Führt die Ausgleichung und Ausreißerdetektion durch. Als Ergebnis erhält man die Koordinatenliste (Transmitter.txt) und eine Angabe über die Genauigkeit der Messungen (accPos.txt).

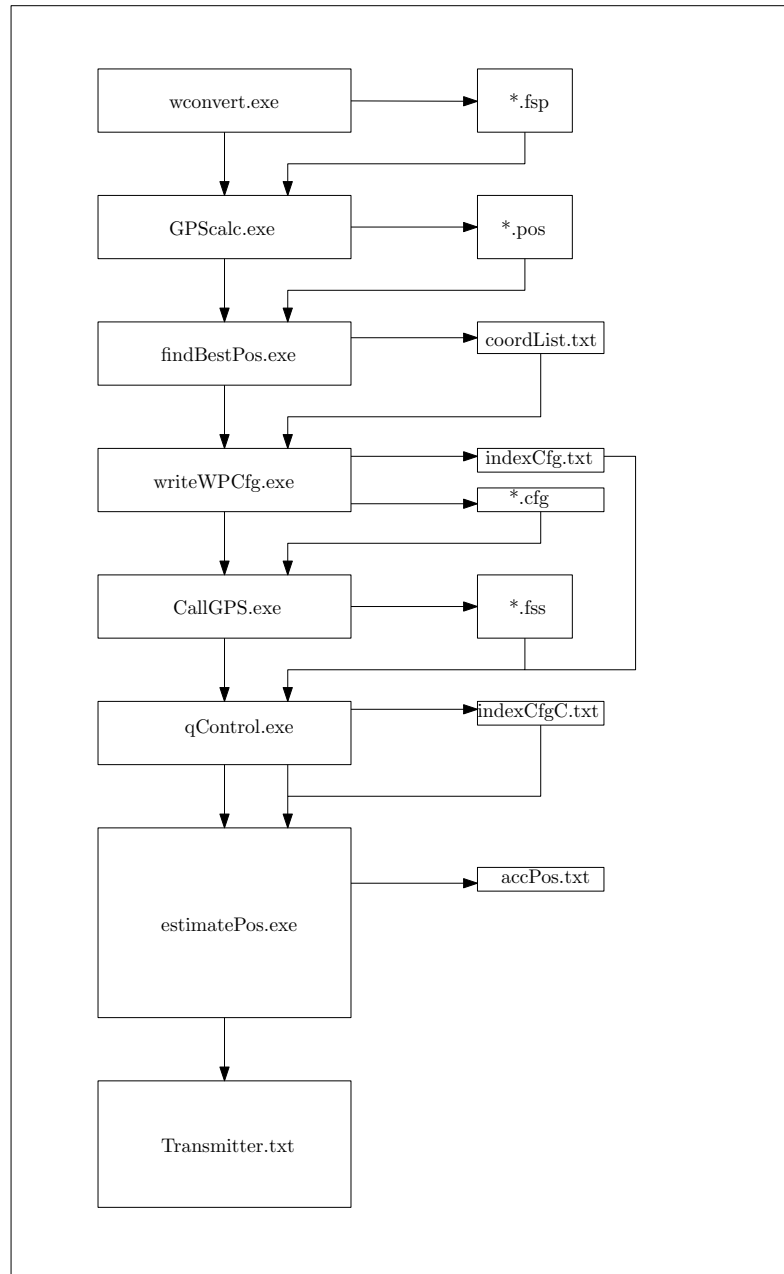


Abbildung 27: Programmablauf

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

Mit der Berechnungssoftware können folgende Aufgaben gelöst werden (siehe Abbildung 28):

- Berechnung von Sternbasislinien
- Berechnung von Ringbasislinien
- Berechnung eines Basislinien-Gesamtnetzes
- Ausreißerdetektion abhängig von einem a posteriori Sigma
- Entfernen des größten Ausreißers
- Entfernen aller Ausreißer
- Verwenden von Symeo - Strecken

```
C:\windows\system32\cmd.exe
D:\GPSTest\Coding\Tests\Area1L01>findBestPos
RCU_192.168.0.101_COM1_gpsrecord.pos
RCU_192.168.0.102_COM1_gpsrecord.pos
RCU_192.168.0.103_COM1_gpsrecord.pos
RCU_192.168.0.104_COM1_gpsrecord.pos
RCU_192.168.0.105_COM1_gpsrecord.pos
RCU_192.168.0.106_COM1_gpsrecord.pos
RCU_192.168.0.107_COM1_gpsrecord.pos
RCU_192.168.0.108_COM1_gpsrecord.pos
All files Loaded!

Minimum Height deviation is: 1.1538 meters
D:\GPSTest\Coding\Tests\Area1L01>pause
Drücken Sie eine beliebige Taste . . .

D:\GPSTest\Coding\Tests\Area1L01>writeWPCfg.exe

Type of network geometry:
1.... Star-Geometry
2.... Ring-Geometry
3.... All-Baselines
Choose:

D:\GPSTest\Coding\Tests\Area1L09\estimatePos.exe
53.256
58.8506
62.9478
64.7649
54.5662
53.4663
45.5825
45.7248
57.29
57.4387
Transmitter File written!
A-posteriori sigma too high (17745.2). Check for outlier? (y/n)
Choose: y

Baseline correction:
(* - Outlier)
1 --> 8 : 0.00m
3 --> 4 : 3.74m *
4 --> 5 : 0.16m
5 --> 6 : 0.29m *
6 --> 7 : 0.12m
7 --> 8 : 0.00m

1. Remove biggest outlier ! 2. Remove all outliers ! 3. Quit
Choose:
```

Abbildung 28: Beispiel einer Berechnung mittels Software

5 Testmessungen

Dieses Kapitel beschreibt die Ergebnisse der unterschiedlichen Testmessungen und deren Auswertung.

5.1 GNSS - Empfängertest

Ziel war es die Genauigkeiten der unterschiedlichen Empfängerklassen zu vergleichen. In mehreren Messungen wurden die Empfänger auf bekannten Punkten aufgestellt und deren absoluten Koordinaten daraufhin mit den bekannten Koordinaten verglichen. Die Beobachtungsdauer betrug dabei 15 Minuten. Weiters wurde auch die Genauigkeitsänderung aller Empfänger bei Verkürzung der Beobachtungszeit untersucht. Die Tests wurden auf dem Firmengelände der Fa. Astrium und auf dem TU-Campus der Neuen Technik in Graz durchgeführt.

- **Low-Budget-Empfänger:** uBlox Antaris 4

Tabelle 20: uBlox Antaris 4 Genauigkeiten am TU-Campus

	Hochwert [m]	Rechtswert [m]	Höhe [m]
Genauigkeit	5.03	0.84	9.03

Wie erwartet liefert der low-cost Code-Empfänger unzureichende Genauigkeiten in Lage und Höhe (siehe Tabelle 20).

- **Code + L1 - Empfänger:** Novatel FlexPak

Tabelle 21: Novatel FlexPak Genauigkeiten im Areal 5.1

Areal 5.1	Hochwert [m]	Rechtswert [m]	Höhe [m]
Transmitter 1	2.03	2.35	16.88
Transmitter 2	4.62	2.59	20.47
Transmitter 3	0.77	0.60	22.15
Transmitter 4	1.53	1.18	0.18
Transmitter 5	0.38	0.48	4.51
Transmitter 6	1.37	0.74	0.65
Transmitter 7	0.41	0.99	2.60
Transmitter 8	0.29	0.83	2.46
Mittelwert	1.43	1.23	8.74

**Hochgenaue ad-hoc
Positionsbestimmung mit GNSS**

Tabelle 22: Novatel FlexPak Genauigkeiten im Areal 23

Areal 23	Hochwert [m]	Rechtswert [m]	Höhe [m]
Transmitter 1	0.59	0.11	1.95
Transmitter 2	0.74	0.31	0.72
Transmitter 3	0.56	0.21	0.71
Transmitter 4	0.27	0.47	1.07
Transmitter 5	0.62	0.14	0.50
Transmitter 6	0.06	0.38	3.04
Transmitter 7	0.55	0.50	1.15
Transmitter 8	0.59	0.47	1.06
Mittelwert	0.51	0.33	1.28

Bei der ersten Messung (siehe Tabelle 21) erkennt man große Abweichungen in den ersten drei Transmittern. Dies führt, im Vergleich zur späteren Messung (siehe Tabelle 22), zu einem schlechteren Mittelwert im Areal 5.1.

- **L1/L2-Empfänger:** Javad, Ashtec zXtreme und Novatel DLV-3

Tabelle 23: Empfängertest von Zweifrequenz-Empfängern am TU-Campus

	Hochwert [m]	Rechtswert [m]	Höhe [m]
Ashtech	0.04	0.41	0.35
Javad	0.11	0.02	0.18

Tabelle 24: Empfängertest von Zweifrequenz-Empfängern im Areal 5.1

DLV-3	Hochwert [m]	Rechtswert [m]	Höhe [m]
Transmitter 1	1.50	2.51	6.22
Transmitter 4	1.00	0.59	0.28
Transmitter 5	1.67	1.20	0.85
Transmitter 6	0.70	1.58	2.58
Transmitter 8	0.78	1.09	3.36
Mittelwert	1.13	1.39	2.67

Der Ashtech und der Javad Empfänger (siehe Tabelle 23) zeigen eindeutig den Genauigkeitsvorteil von Zweifrequenz-Empfängern. Bei der Messung mit dem DLV-3 (siehe Tabelle 24) dürfte es zu Fehlern gekommen sein, da diese Messungen im Vergleich zu Ashtech und Javad sehr ungenau sind. Diese Ungenauigkeiten dürften auf die Verwendung einer fehlerhaften Antenne zurückzuführen sein.

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

- **Verkürzte Beobachtungszeit:**

Tabelle 25: Verkürzung der Beobachtungszeit aller Empfänger

uBlox	Hochwert [m]	Rechtswert [m]	Höhe [m]
10 min	3.15	3.33	12.45
5 min	1.27	1.98	14.55
Flexpak	Hochwert [m]	Rechtswert [m]	Höhe [m]
10 min	1.77	1.36	8.62
5 min	2.14	1.44	9.10
Ashtech	Hochwert [m]	Rechtswert [m]	Höhe [m]
10 min	0.54	0.59	0.24
5 min	1.58	1.14	0.01
Javad	Hochwert [m]	Rechtswert [m]	Höhe [m]
10 min	0.12	0.14	0.45
5 min	0.17	0.08	0.45
DLV-3	Hochwert [m]	Rechtswert [m]	Höhe [m]
10 min	1.27	1.38	1.87
5 min	1.44	1.49	2.00

Die Verkürzung der Beobachtungszeit (siehe Tabelle 25) wirkt sich in den Absolutpositionen der meisten Empfänger ähnlich aus. Lediglich der Javad-Empfänger kann selbst bei der sehr kurzen 5-minütigen Beobachtungsdauer seine Genauigkeit beibehalten. Die Verbesserung des Hoch- und Rechtswertes bei dem uBlox-Empfänger dürfte durch Zufall entstehen.

5.2 Testmessungen im Areal 23

Das Testareal um das Gebäude 23 ist in etwa 140 m x 140 m groß und besteht aus mehreren Gebäuden und Vegetation. In Abbildung 29 sieht man die Position der ILT-Transmitterstationen in diesem Areal.



Abbildung 29: Transmitterpositionen in Areal 23

Die Bestpos-Lösungen im Test-Areal um das Gebäude 23 sind gut und vollständig (siehe Abbildung 30). Es sind keine Auffälligkeiten zu erkennen. Die Basislinienberechnung kann für jede Basislinie durchgeführt werden. Die Ambiguitäten können teilweise ganzzahlig fixiert werden und die Basislinien sind frei von groben Fehlern.

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

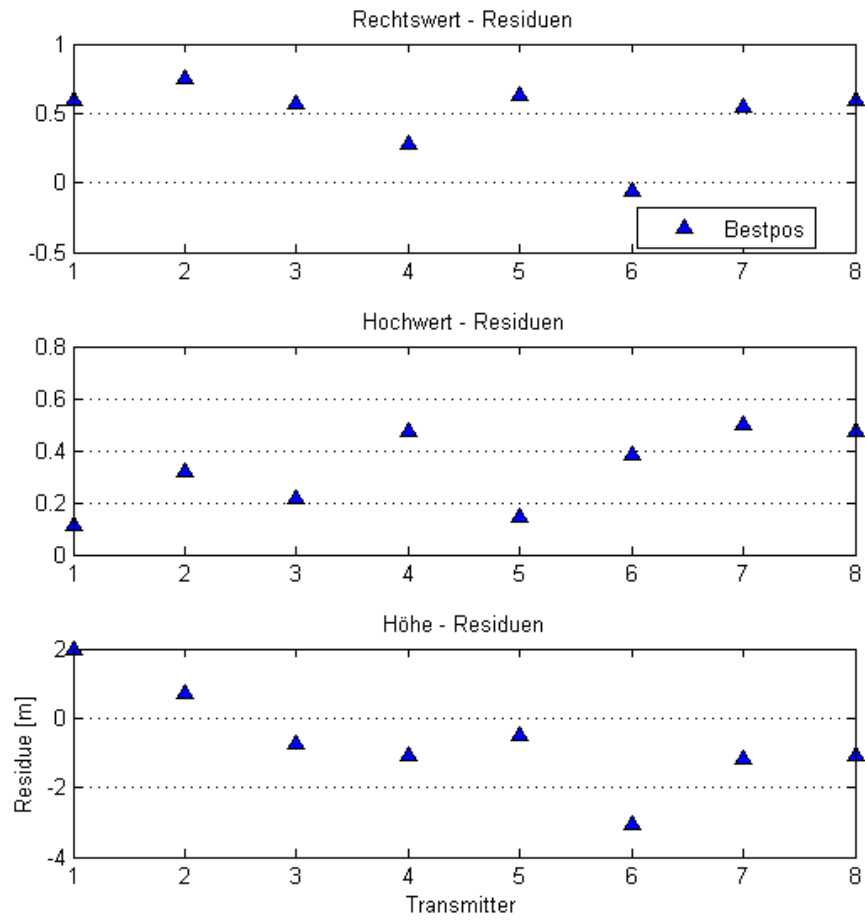


Abbildung 30: Residuen der absoluten Transmitterpositionen im Areal 23

5.2.1 Bestpos + Basislinien-Stern

Der Stern ist stark abhängig vom Haupttransmitter (in diesem Fall Transmitter 7). Die Fehler des Hauptpunktes wirken sich bei der Lagerung am stärksten auf die Lösung aus (siehe Abbildung 31). Dies erkennt man beim Vergleich der Residuen der absoluten Position für Transmitter 7 (siehe Abbildung 30). Diese entsprechen in etwa (bis zu 10 cm Abweichung) dem Offset des Basislinien-Sterns.

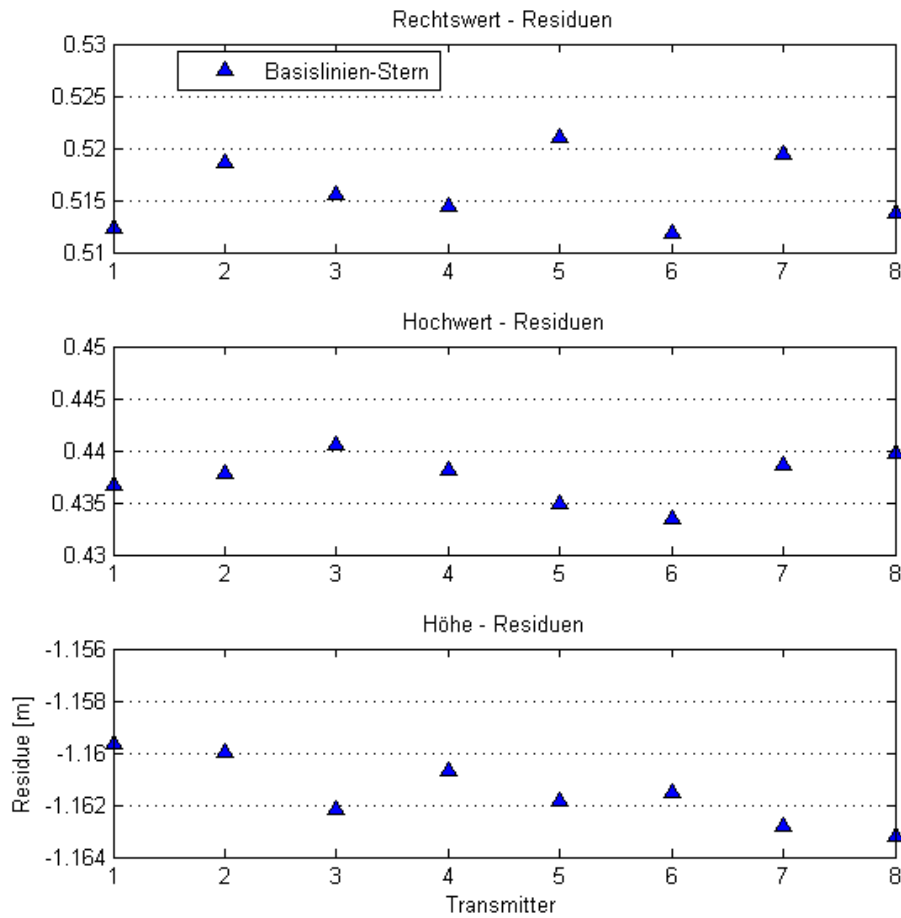


Abbildung 31: Bestpos + Basislinien-Stern Residuen im Areal 23

5.2.2 Bestpos + Basislinien-Ring

Die Messungen sind in diesem Fall (siehe Abbildung 32) gleichmäßig verteilt (jeder Punkt einmal als Start und Endpunkt einer Basislinie). Der Offset entsteht durch die Lagerung, welche abhängig von den Standardabweichungen der Lagerungspunkte ist. Transmitter 4 hat die geringste berechnete Standardabweichung (siehe Kapitel 4.4 auf Seite 55) und hat somit den größten Einfluss bei der Lagerung. Signifikante Genauigkeitsunterschiede zum Basislinien-Ring sind nicht zu erkennen.

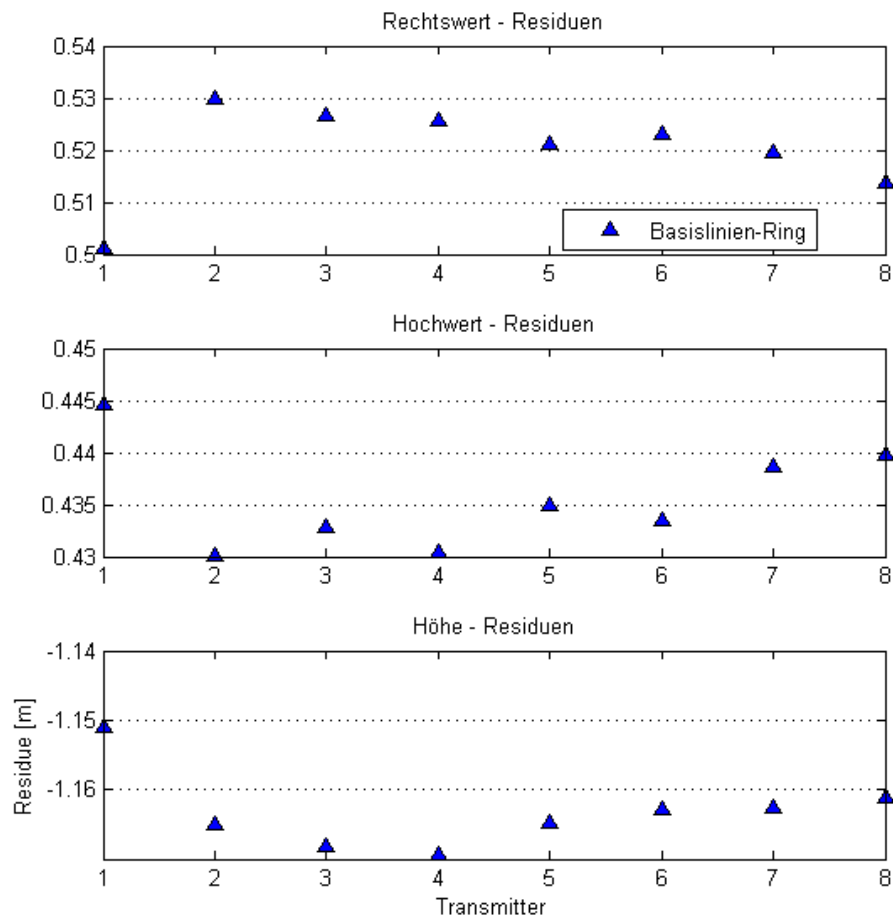


Abbildung 32: Bestpos + Basislinien-Ring Residuen im Areal 23

5.2.3 Bestpos + Basislinien-Gesamtnetz

Das Basislinien-Gesamtnetz hat die höchste Überbestimmung und ist somit am wenigsten anfällig gegen Ausfälle von Basislinien. Durch die hohe Überbestimmung können fehlerhafte Basislinien entfernt werden. Im Fall des Testareals um das Gebäude 23 zeigen sich kaum Unterschiede in der Genauigkeit (siehe Abbildung 33) zu den zwei anderen Methoden, da die Qualität der Messungen in diesem Areal hoch ist.

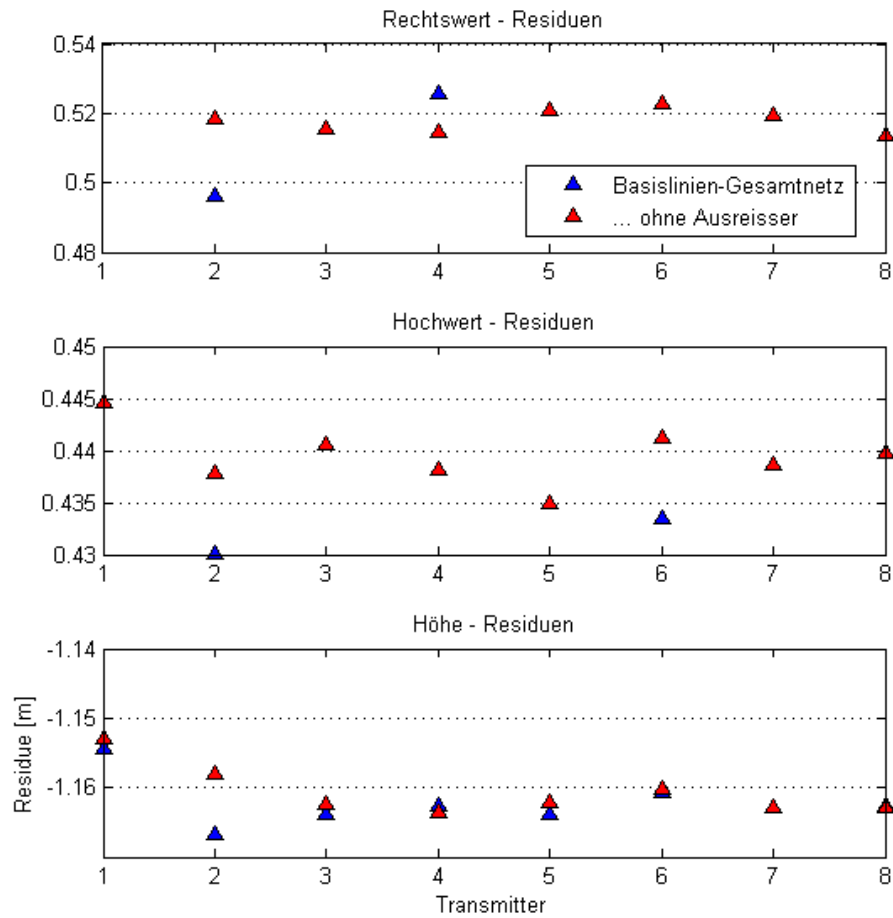


Abbildung 33: Bestpos + Basislinien-Gesamtnetz Residuen im Areal 23

5.2.4 Hinzunahme von Symeo-Streckenmessungen

Der Einsatz von Symeo im Testareal um das Gebäude 23 bringt kaum Verbesserungen mit sich. Dies liegt an den gut bestimmten Basislinien und da die Hauptfehlerquelle in den absoluten Positionen liegt, welche sich in den drei Methoden ähnlich stark auswirken.

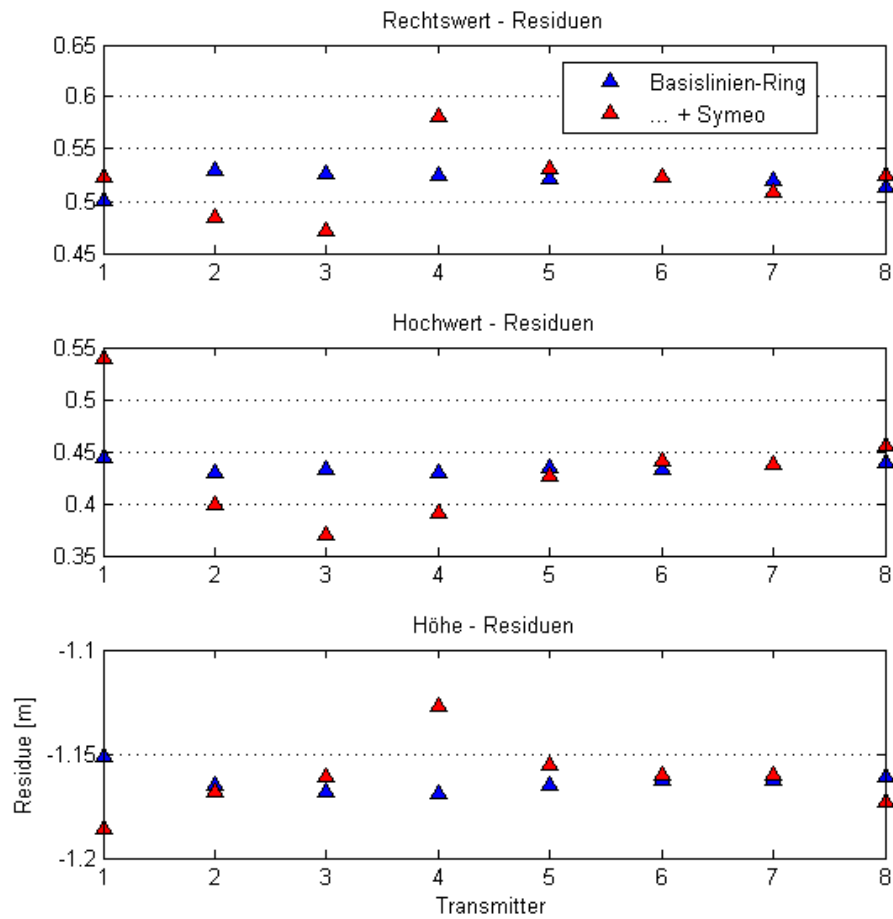


Abbildung 34: Bestpos + Basislinien-Ring + Symeo Residuen im Areal 23

5.3 Testmessungen im Areal 5.1

Das Testareal 5.1 (siehe Abbildung 35) kann als problematisches Areal kategorisiert werden. Auf der einen Seite kommt es zu fehlerhaften Basislinienberechnungen und auf der anderen Seite zu einer fehlerhaften GPS-Absolutpositionsbestimmung.

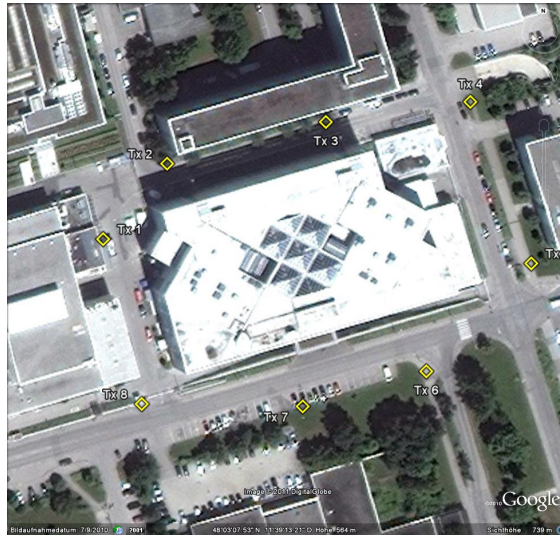


Abbildung 35: Transmitterpositionen in Areal 5.1

Die Bestpos-Lösungen (siehe Abbildung 36) sind in zwei Kategorien eingeteilt. Die Transmitter 1-3 weisen hohe Standardabweichungen und hohe Residuen auf, hervorgerufen durch Abschattungen und starke Mehrwegeeffekte. Durch die Abschattung von Transmitter 3 kann dieser über die gesamte Beobachtungsdauer nicht genügend Satelliten zur Berechnung von Basislinien empfangen. Diese Abschattungen entstehen durch die Positionierung des Transmitters zwischen zwei und eng benachbarten Gebäuden (siehe Abbildung 35). Die Transmitter 4-8 haben eine freie Sicht auf den Himmel und sind weniger anfälliger für Mehrwegeeffekte, da sie in einem größeren Abstand zu den Gebäuden stehen.

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

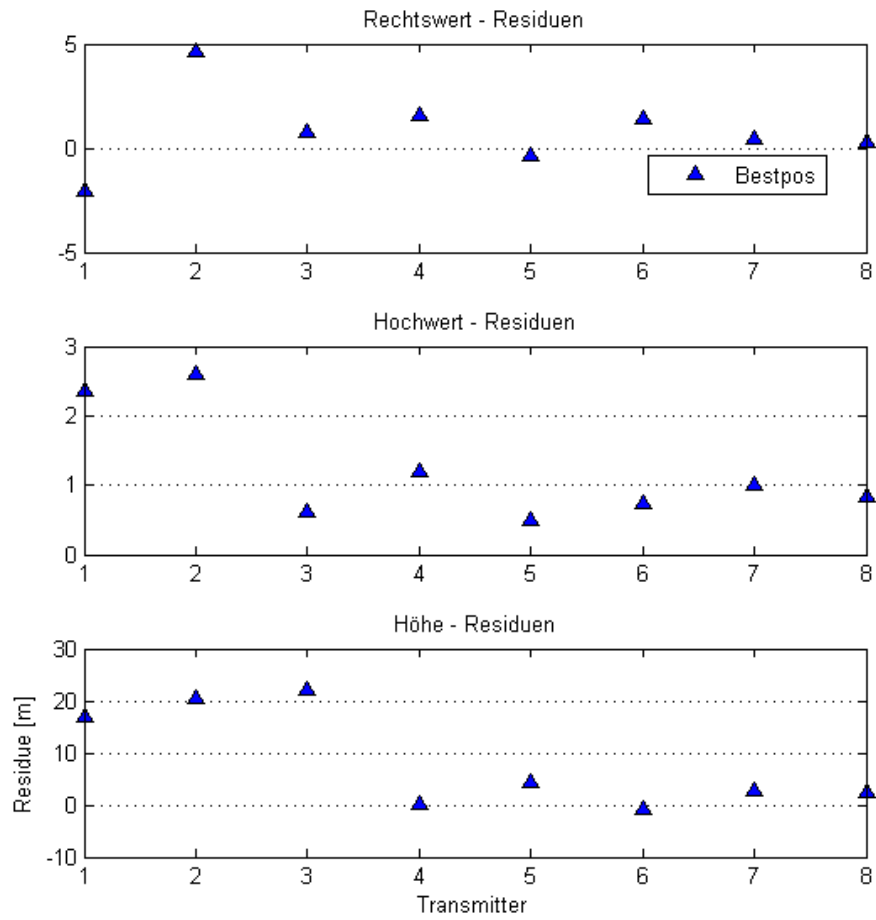


Abbildung 36: Residuen der absoluten Transmitterpositionen im Areal 5.1

5.3.1 Bestpos + Basislinien-Stern

Die Genauigkeit der Transmitter 1 und 2 wird deutlich verbessert, da jedoch zu Transmitter 3 nur eine fehlerhafte Basislinie gerechnet wurde verbleibt dieser mit 15m Fehler in der Höhe. Dieser große Fehler zieht somit auch alle anderen Punkt um etwa 2m in die Höhe (siehe Abbildung 37), da dieser die Lagerung beeinflusst.

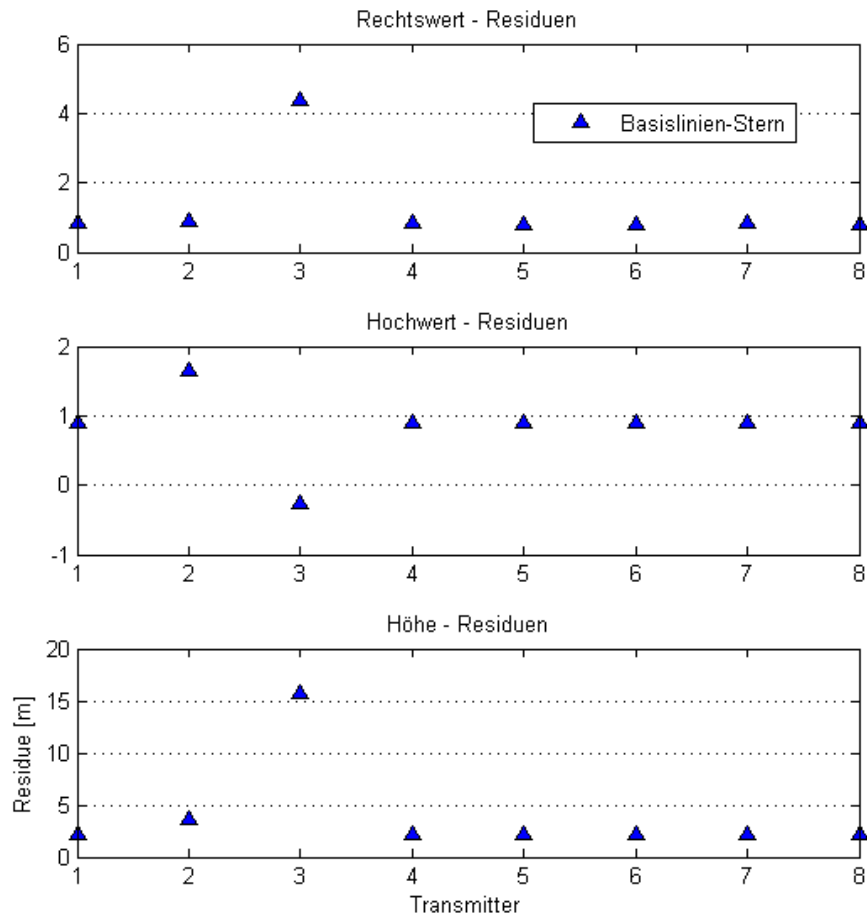


Abbildung 37: Bestpos + Basislinien-Stern Residuen im Areal 5.1

5.3.2 Bestpos + Basislinien-Ring

Die Berechnungssoftware ist nicht in der Lage die Basislinien zu den Transmittern 2 und 3 innerhalb des Ringes zu berechnen. Somit bleiben Transmitter 2 und 3 unkontrolliert und bekommen ihre verfälschten Bestpos-Lösungen als Transmitterkoordinaten (siehe Abbildung 38).

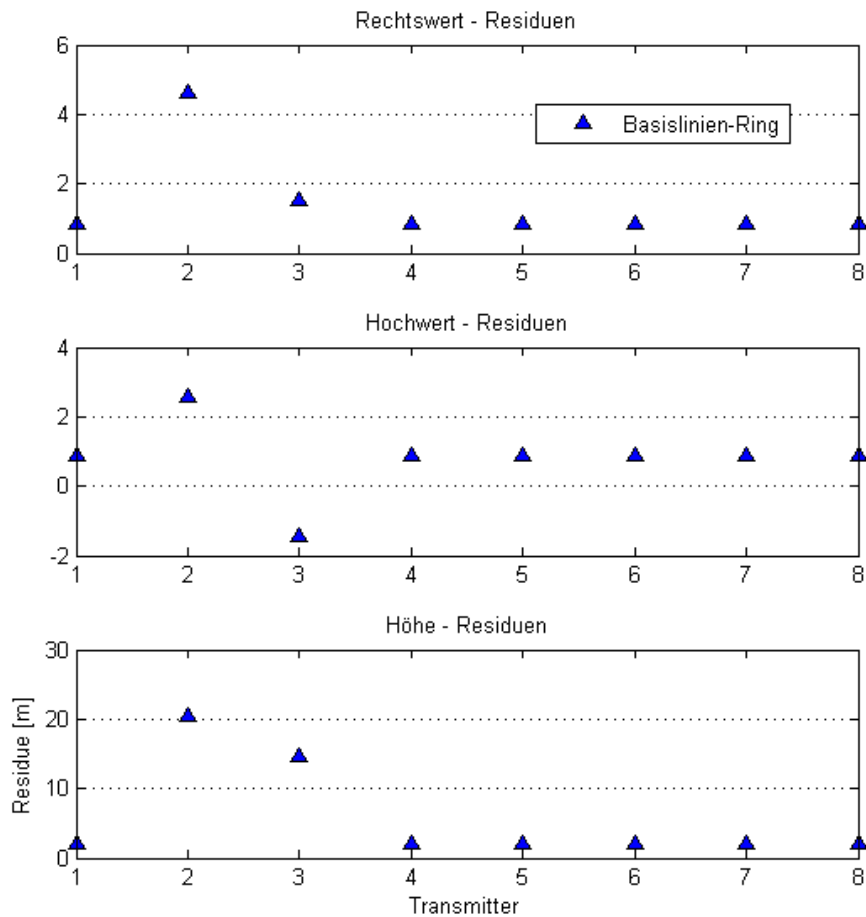


Abbildung 38: Bestpos + Basislinien-Ring Residuen im Areal 5.1

5.3.3 Bestpos + Basislinien-Gesamtnetz

Das Basislinien-Gesamtnetz bietet im Vergleich zu dem Ring und dem Stern die höchste Genauigkeit. Der Ausreißertest verbessert die Transmitter leicht bis auf Transmitter 3. Dieser verschlechtert sich, da alle Basislinien zu Transmitter 3 als Ausreißer detektiert werden. Somit bekommt Transmitter 3 seine Position rein aus den Bestpos-Lösungen (siehe Abbildung 39), welche stark fehlerbehaftet sind.

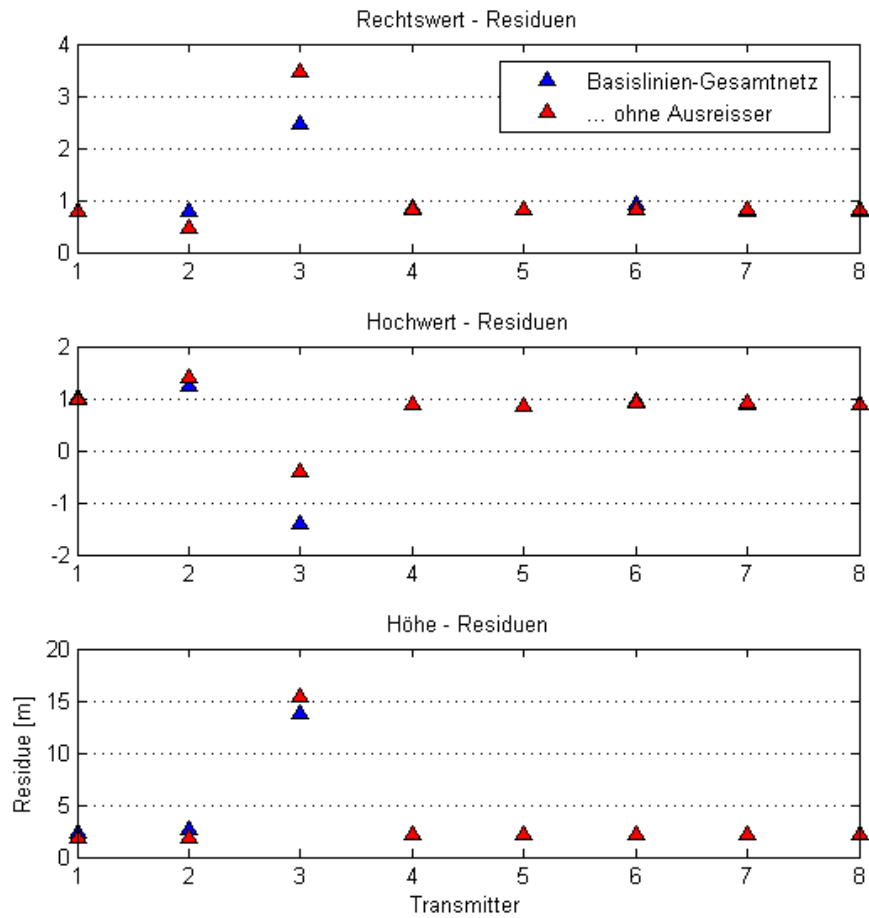


Abbildung 39: Bestpos + Basislinien-Gesamtnetz Residuen im Areal 5.1

5.3.4 Hinzunahme von Symeo-Streckenmessungen

Symeo-Messungen tragen auch hier nur zu einem geringen Teil zur Verbesserung der Transmitterkoordinaten bei. Die Genauigkeit des Rechtswertes in Transmitter 3 verschlechtert sich etwas durch Symeo jedoch verbessert sich der Hochwert (siehe Abbildung 40).

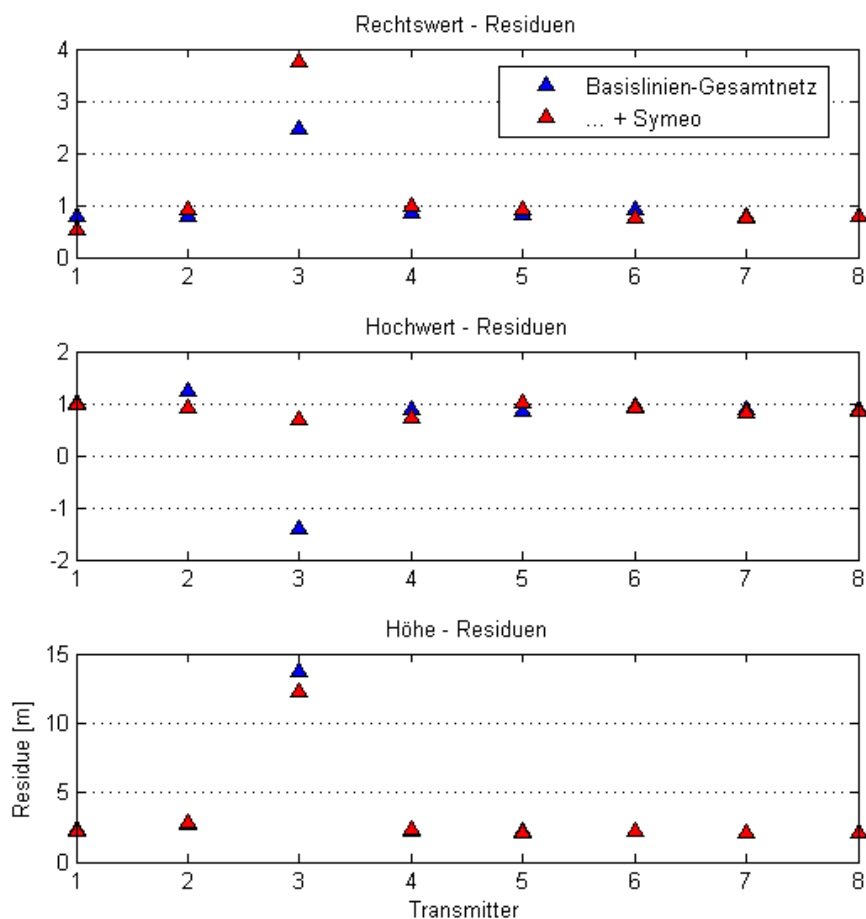


Abbildung 40: Bestpos + Basislinien-Gesamtnetz + Symeo Residuen im Areal 5.1

5.4 Testmessungen im Areal 24

Die Messungen um das Gebäude 24 wurden zur Überprüfung der temporalen Veränderung der GPS-Absolutpositionen verwendet. Dabei wurde untersucht wie sich die Koordinaten der selben Messpunkte zu verschiedenen Zeitpunkten verändern. Es wurden zwei Messungen mit je 8 Transmittern in einem Abstand von 90 Minuten durchgeführt. Zu erkennen ist eine schlechtere Genauigkeit bei Transmitter 4, da dieser unter einem Baum platziert wurde. Der Ausgleich verbessert die ungenaueren Koordinaten korrekt. Besonders gut sieht man diesen Effekt in der Höhenkomponente (siehe Abbildung 41 und 42).

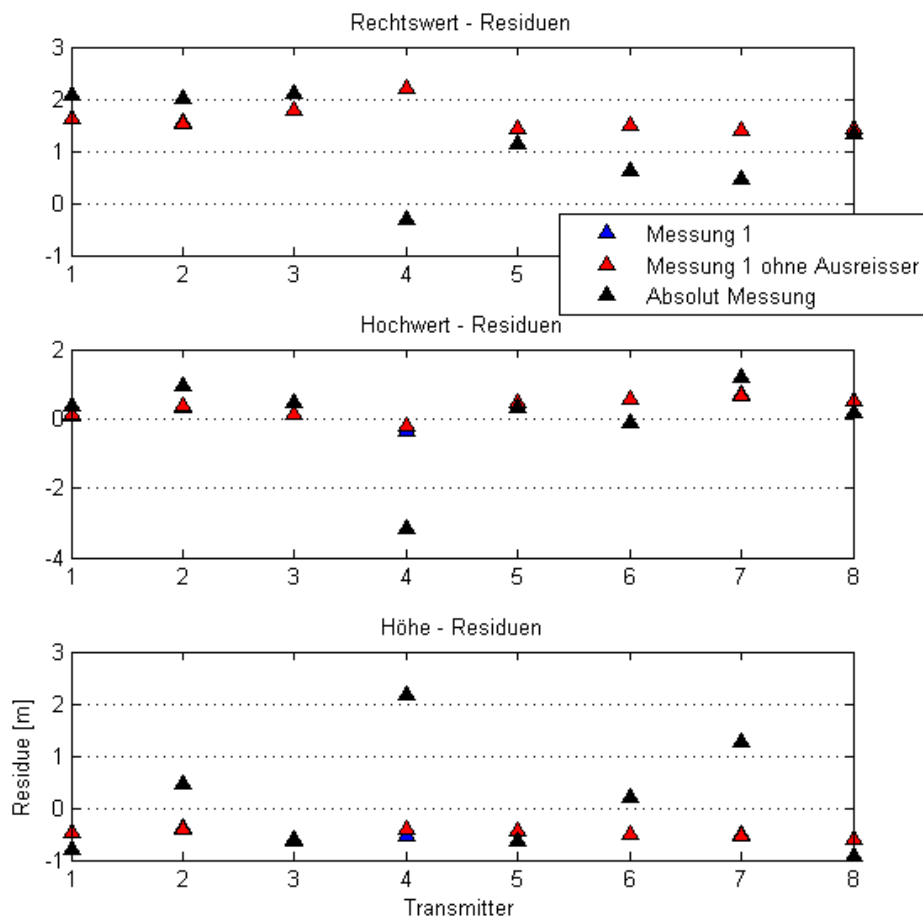


Abbildung 41: Basislinien-Gesamtnetz der Messepoche 1 im Areal 24

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

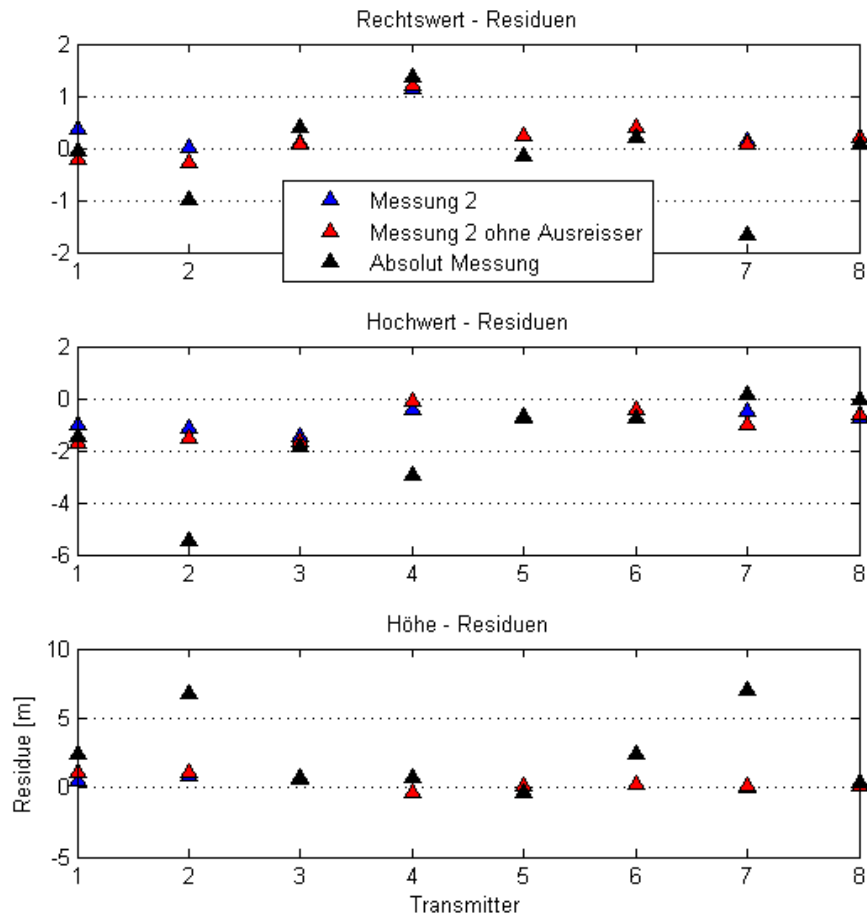


Abbildung 42: Basislinien-Gesamtnetz der Messepoche 2 im Areal 24

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

Im zeitlichen Aspekt unterscheiden sich die Absolutmessungen recht stark, jedoch weisen die ausgeglichenen Positionen einen ähnlichen Trend auf. Der Offset zwischen den beiden Messungen kommt aus den unterschiedlichen Absolutpositionen der zwei Epochen. Alles in Allem wurde in Messung 1 wie in Messung 2 eine ausreichende Genauigkeit in Höhe und Lage erreicht (siehe Abbildung 43).

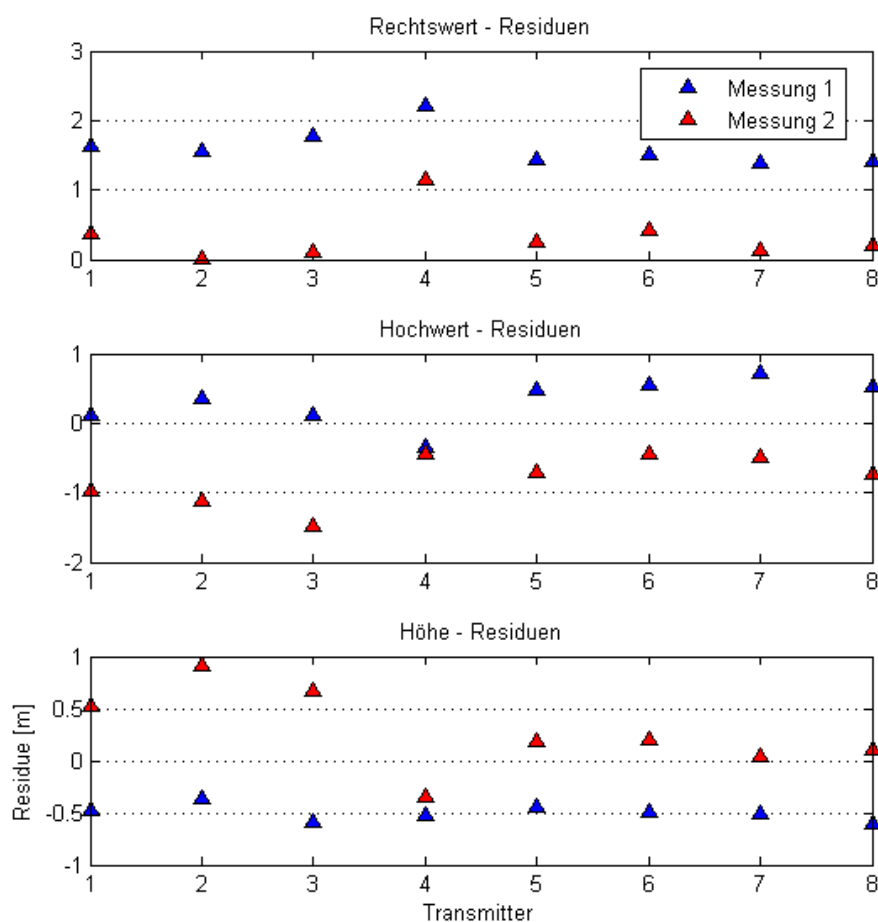


Abbildung 43: Vergleich der Messepoche 1 und der Messepoche 2 im Areal 24

5.5 Reduzierung der Beobachtungszeit

Hierbei wurde untersucht wie sehr sich die Genauigkeiten der Basislinien und Bestpos-Lösungen bei der Verkürzung der Beobachtungszeit und bei der Verwendung von unterschiedlichen Netzgeometrien verändern.

5.5.1 Testmessungen im Areal 23

Bei einer Beobachtungszeit von 10 min sind die Basislinien noch ausreichend genau bestimmt und somit wirkt sich die geringere Menge der zu mittelnden Bestpos-Lösungen hier aus. Die Unterschiede sind jedoch im 5-10cm Bereich und somit vernachlässigbar (siehe Abbildung 44).

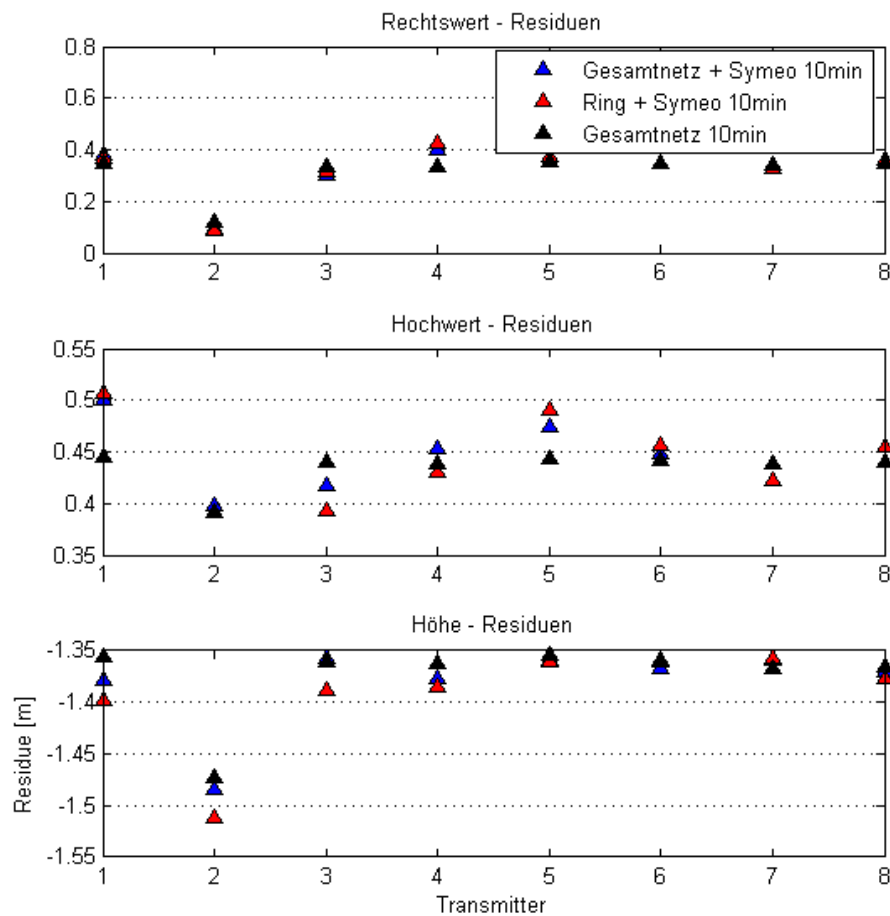


Abbildung 44: Residuen bei 10min Beobachtungszeit im Areal 23

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

Durch die schon sehr geringe Beobachtungszeit von 5min treten größere Fehler in den Basislinien zu Transmitter 6 auf. In diesem Fall erhält man durch den Zusatz der Symeo-Streckeninformation eine erhebliche Verbesserung der Position in Höhe und Lage (siehe Abbildung 45).

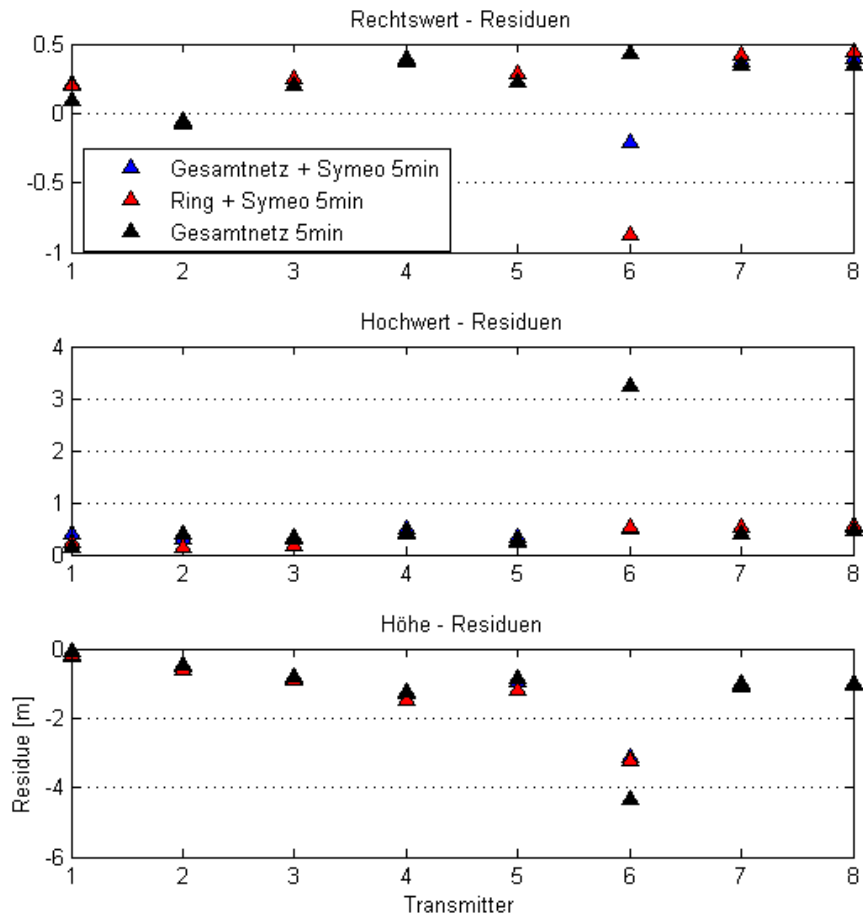


Abbildung 45: Residuen bei 5 min Beobachtungszeit im Areal 23

5.5.2 Testmessungen im Areal 5.1

Wie bereits im Testareal 23 erkannt, zeigt Symeo bei reduzierten Beobachtungszeiten und somit schlechter bestimmten Basislinien seine Stärke. Die Positionen werden deutlich durch die Verwendung von Symeo verbessert (siehe Abbildung 46 und 47).

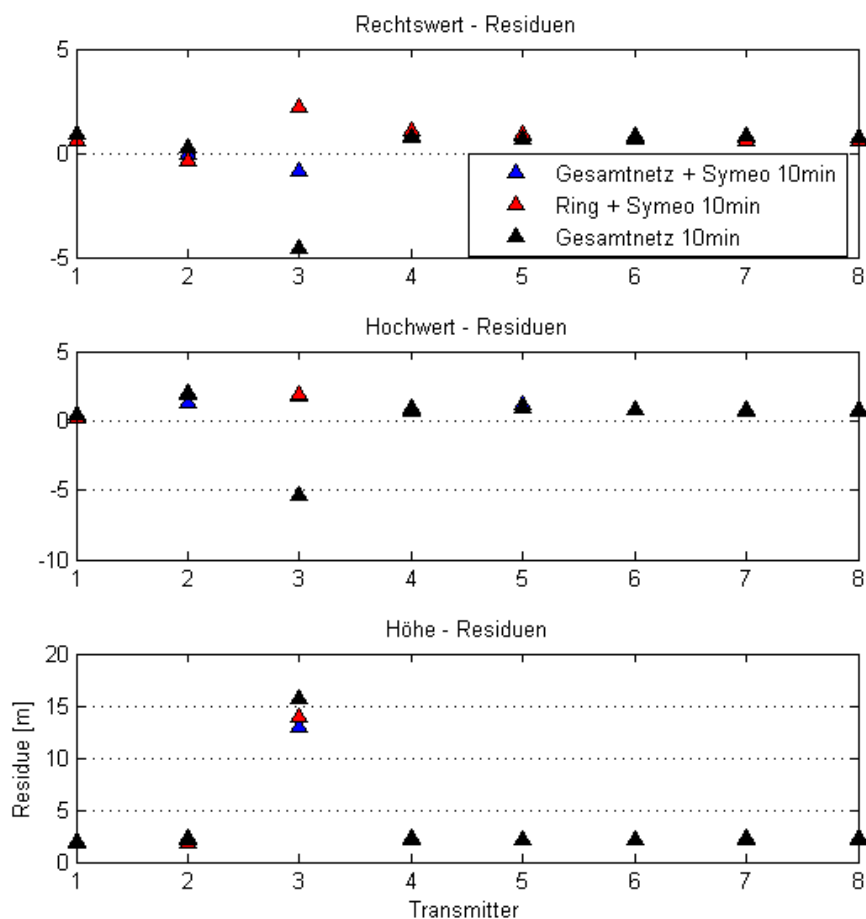


Abbildung 46: Residuen bei 10min Beobachtungszeit im Areal 5.1

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

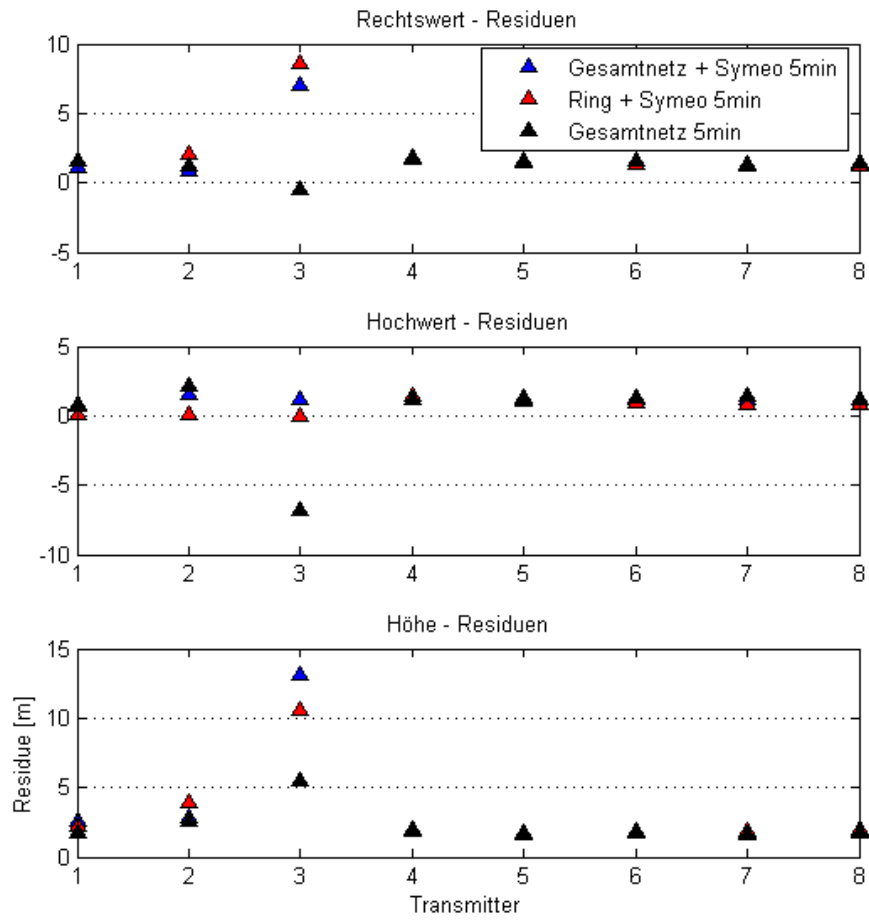


Abbildung 47: Residuen bei 5 min Beobachtungszeit im Areal 5.1

5.6 Hybridnetze

Hierbei wird untersucht ob die Positionen aller Transmitter durch die Verwendung einzelner genauerer Empfänger verbessert werden kann. Als genaue Punkte wurden der Transmitter 4 und der Transmitter 8 eingeführt. Diese haben eine Genauigkeit von 10 cm in der Lage und 15 cm in der Höhe. Generell kann man sagen, dass die Genauigkeit aller Transmitter durch das Einführen einer hochgenauen Absolutposition verbessert wird. Die Ausreißer in Transmitter 3 im Areal 5.1 können dadurch aber nicht behoben werden. Die Verwendung von zwei genaueren Empfängern erhöht die Genauigkeit nur mehr geringfügig, erhöht jedoch die Redundanz der hochgenauen Messungen. In der folgenden Abbildungen 48 wird ein Gesamtnetz ohne, mit einem und mit zwei genauen Empfängern verglichen.

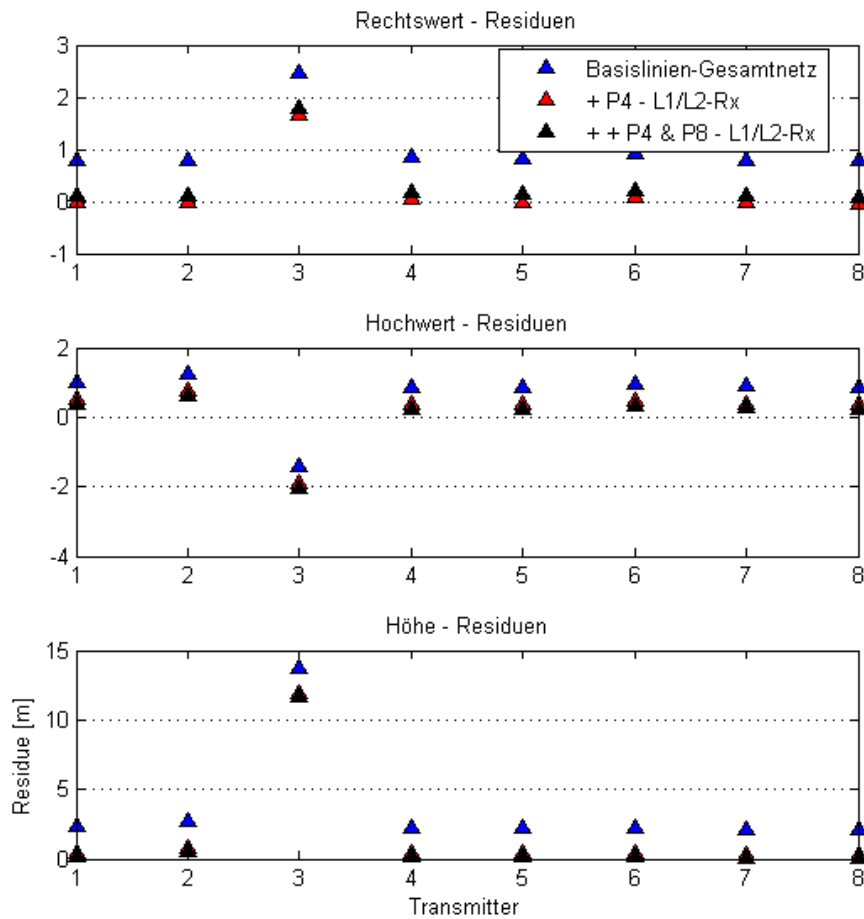


Abbildung 48: Basisliniengesamtnetz mit unterschiedlichen Empfängertypen im Areal 5.1

5.7 Fazit der Testmessungen

Bei den Testmessungen wurden die Szenarien einer fehlerhaften (Areal 5.1) und einer guten Messkampagne (Areal 23) untersucht. Charakteristisch für das Testareal 5.1 sind enge Häuserschluchten, somit schlechte Sichtbarkeit der GPS-Satelliten und starke Mehrwegeeffekte. Hier entsteht auch der worst-case Fall mit Transmitter 3 zudem alle Basislinien mit groben Fehlern behaftet bzw. nicht lösbar sind. Diese Fehler können durch die Ausgleichung verringert, jedoch nicht vollständig eliminiert werden. Grundsätzlich ist die Gesamtnetzausgleichung die robusteste Berechnungsmethode. Grobe Fehler können dank der hohen Redundanz der Messungen leicht lokalisiert und eliminiert werden. Der Nachteil dieser Methode ist die erhöhte Berechnungsdauer, welche durch die Schätzungsdauer aller Basislinien entsteht. Beim Testareal 23 hingegen erhält man durch die rechenaufwändigere Gesamtausgleichung kaum einen Vorteil, da die Basislinienberechnungen frei von groben Fehlern sind und somit kein Vorteil aus der Überbestimmung erlangt werden kann. Bei der Verringerung der Beobachtungszeiten bekommen die Basislinien und Bestpos-Lösungen eine größere Standardabweichung. In diesem Fall sind die zusätzlichen Streckenmessungen aus dem Symeo-Sync-System vorteilhaft, da diese auch bei kurzen Beobachtungszeiten im Vergleich zu den Basislinien eine höhere Genauigkeit aufweisen und die Ausgleichung damit unterstützen. Bei der zusätzlichen Verwendung von Symeo-Streckenmessungen ist der Unterschied nach der Ausgleichung zwischen einer Messung mit langer Beobachtungsdauer (15 min) und einer Messung mit geringer Beobachtungsdauer (5 min) kleiner als einen Meter und somit geringer als bei derselben Ausgleichung ohne Symeo-Streckenmessungen. Die kurze Beobachtungsdauer könnte jedoch zu Problemen beim Download der notwendigen Ephemeriden und Almanachdaten führen, da der Download bis zu 12 Minuten dauern kann. Die zeitliche Variationen der GPS-Messungen im Areal 24 und somit deren Genauigkeiten betreffen zum größten Teil die Absolutmessungen. Die Basislinien liefern zu verschiedenen Zeitpunkten keine signifikanten Unterschiede. Somit ist die Netzgeometrie zeitlich konstant, jedoch nicht die Lagerung. Zusammenfassend kann man durch den behandelten Ansatz der Ausgleichung eines GPS-Netzes mit weicher Lagerung im Durchschnitt eine Genauigkeit von 1-2 Meter in Höhe und Lage erreichen. Diese kann bei gut gewählten Standpunkten besser ausfallen. Die Verwendung von genaueren Empfängern (Zweifrequenz) wirkt sich sehr positiv auf die Genauigkeit der Transmitterpositionen aus. Weiters ist es mit Zweifrequenzempfängern auch bei sehr kurzen Beobachtungszeiten (< 5 min) möglich genaue Lösungen der Basislinien zu erhalten.

6 Alternative Positionierungsmethoden und Positionsalgorithmen

Im folgendem Kapitel werden alternative Positionierungsmethoden für die Transmitter auf ihre Vor- und Nachteile untersucht. Weiters wird ein verbesserter und robusterer Positionierungsalgorithmus für den ILT-Empfänger beschrieben. Abschließend geht es um die Anfälligkeiten des ILT-Systems gegen böswillige Störung oder Verfälschung und deren Auswirkungen.

6.1 Transmitterpositionierung

Bisher wurde nur die Transmitterpositionierung mittels GPS-Absolutmessungen und mittels Hin- und Rückmessungen von naheliegenden Referenzstationen untersucht. Es bestehen jedoch auch andere Möglichkeiten die Position der Transmitter zu bestimmen.

6.1.1 WARTK und SBAS

- **Wide area real-time kinematics:** Real-time kinematics (RTK) ist ein Positionierungsverfahren bei dem relative GPS-Messungen in Echtzeit durchgeführt werden. Wie bei der relativen Messung wird dazu eine bekannte Referenzstation benötigt welche zur gleichen Zeit die gleichen Satelliten wie die Nutzerstation (Rover) beobachtet. Die Beobachtungen der Referenzstation werden mittels Funkverbindung in nahezu Echtzeit zum Rover übertragen, welcher die Positionsrechnung durchführt. Bei kurzen Basislinien (2-3 km) lassen sich die Mehrdeutigkeiten auch in Echtzeit lösen. Somit bekommt man Koordinaten in Echtzeit und kann auch Absteckaufgaben durchführen. Dieses Verfahren kann man bis zu einer Basislinienlänge von 10-20 km durchführen, da RTK fixierte double-differenced Mehrdeutigkeiten benötigt. Bei Wide Area RTK (WARTK) beträgt die Reichweite in etwa 500-900 km. Dafür wird jedoch ein Netz aus Referenzstationen und ein genaues Ionosphärenmodell (z.B. aus einer Central Processing Facility) benötigt (siehe Abbildung 49). Ein Beispiel für ein solches Netz aus Referenzstationen wäre EGNOS mit seinem Ranging and Monitoring Stations (EGNOS RIMS). Dieser Service könnte die Nutzer mit WARTK-Korrekturen beliefern und würde zu einer Genauigkeit von in etwa 10 cm in Lage und Höhe führen. Benötigt werden jedoch auf jeden Fall Mehrfrequenz GNSS-Empfänger. Die Dauer zur Positionslösung liegt bei Zweifrequenz-Empfängern bei wenigen Minuten und bei Dreifrequenz-Empfängern bei wenigen Sekunden. Die Schwierigkeiten jedoch liegen bei der Verwendung und dem Verstehen der Schätzung des Ionosphärenfehlers, der Verwendung von präzisen und korrekten Ionosphären-Modellen und der Übertragung der Korrekturen über lange Strecken an den Nutzer. [HP10]

Long-Baseline (hundreds Km) OTF Ambiguity Resolution

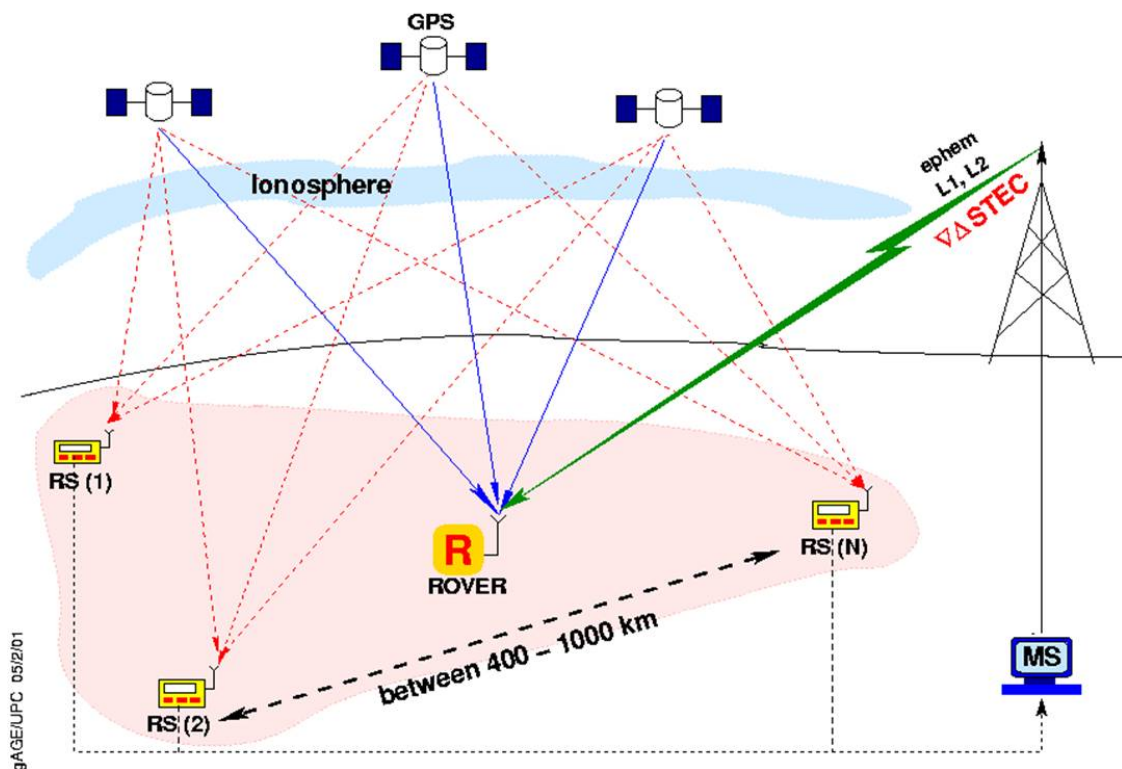


Abbildung 49: WARTK Systemskizze [Eur06]

- **Space-based augmentation systems:** Hier eine Übersicht über die vorhandenen Systeme (siehe Abbildung 50):
 - WAAS für Nordamerika
 - EGNOS für Europa
 - MSAS für Japan
 - SDCM für Russland (geplant)
 - GAGAN für Indien (Testbetrieb)

Space-based augmentation systems (SBAS) bestehen aus einem Netzwerk von terrestrischen Stationen und geostationären Satelliten. In den Referenzstationen werden aus den Beobachtungen Korrekturen für die Satellitenorbits, Satellitenuhren und die Ionosphäre berechnet. Empfängerfehler wie z.B. Multipath und Empfängeruhrenfehler sowie lokale troposphärische Einflüsse können nicht korrigiert werden. Integritätsinformationen der GPS-Satelliten und die berechneten Korrekturen werden über C-Band an die SBAS - Satelliten übermittelt. Die

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

Korrekturen werden mit einem GPS ähnlichen Signal an die GPS-Empfänger übertragen. Weiters ist es möglich dieses GPS ähnliche Signal als zusätzliche Beobachtung zu verwenden (GEO-Ranging). Durch die Korrekturen verbessert sich die absolute Genauigkeit auf 1-3 m (95%) horizontal und 2-4 m (95%) vertikal. Der Zeitfehler wird auf 10 ns reduziert. Nebenbei gibt es einen hohen Anstieg der Integrität, welche für das ILT - System jedoch nur von geringer Bedeutung ist. SBAS Systeme unterstützen GPS-Messungen besonders in Situationen in denen nur wenige GPS-Satelliten beobachtet werden können.

Aufgrund des geostationären Orbits der SBAS Satelliten kann es in bevölkerten Städten in Europa / Nordamerika bzw. in Städten welche weit vom Äquator entfernt sind zu Problemen kommen. Je weiter man sich vom Äquator entfernt, desto geringer wird die Elevation der SBAS-Satelliten, was in Häuserschluchten zu Abschattungen führen kann. Eine weitere Einschränkung ist die lokale Definition der SBAS Systeme. Die Systeme haben decken nur einen bestimmten Teil der Erdoberfläche ab (siehe Abbildung 50) und sind somit nicht global verfügbar. [Kow09b]

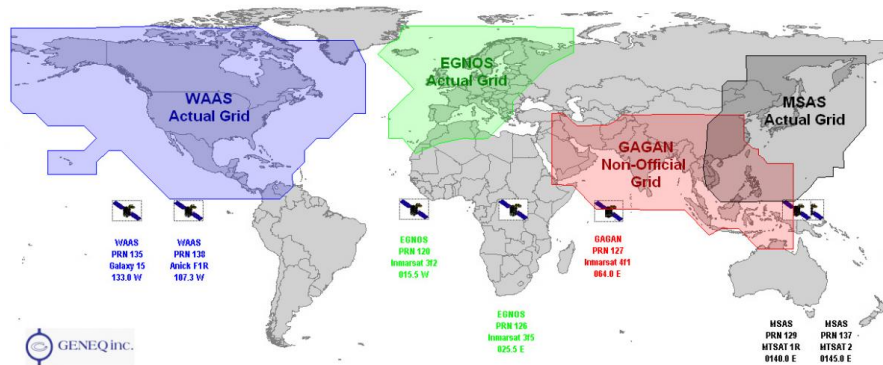


Abbildung 50: SBAS Netzwerk [Gen10]

6.1.2 Geoinformationssysteme

Auch über Geoinformationssysteme (GIS) könnten die Transmitterkoordinaten bestimmt werden. Die Idee dabei ist, die Transmitterposition im Vorhinein auf einer Karte bzw. einem georeferenzierten Orthofoto zu bestimmen und bei der Messung die Transmitter auf diesen Punkten aufzustellen. Die Schwierigkeit hierbei ist markante Punkte auf der Karte so auszuwählen, dass man sie in der Natur wieder findet. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung hängt von folgenden Faktoren ab:

- Bodenauflösung des Luft- / Satellitenbildes
- Genauigkeit und Anzahl der Passpunkte für die Georeferenzierung
- Genauigkeit beim Auswählen der Transmitterpunkte

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

- Genauigkeit beim Positionieren der Transmitter auf den Punkten

Bei Bodenauflösungen kann zwischen dem Luft- und dem Satellitenbild unterschieden werden. Die Bodenauflösung wird in Meter pro Pixel angegeben. Bei Luftbildkameras ist die Bodenauflösung von der Kamera abhängig, von der Fluggeschwindigkeit und von der Flughöhe. Als Beispiel wird hier die Luftbildkamera ULTRACAM EAGLE von Vexcel/Microsoft angegeben (siehe Abbildung 51). Sie hat eine geometrische Bodenauflösung von 10 cm bei 268 Knoten und 5 cm bei 134 Knoten bei 80% Überlappung im panchromatischen Bereich.



Abbildung 51: Ultracam XP Crop (<http://www.terra-messflug.at>)

Das Pendant zur Luftbildkamera ist die satellitengestützte Kamera. Hochauflösende Systeme sind u.a. WorldView-1, GeoEye-1, Quickbird-2 und Ikonos-2. Diese Systeme bieten eine Auflösung von in etwa 50 cm pro Pixel im panchromatischen Bereich (siehe Abbildung 52). Ein Nachteil ist die größere Abhängigkeit von den Wetterverhältnissen, da bei Bewölkung Satelliten keine Sicht auf den Boden haben.



Abbildung 52: Quickbird-2 Crop Bahrain (<http://www.digitalglobe.com>)

Um aus den Bildern Koordinaten extrahieren zu können, müssen diese über bekannte Passpunkte georeferenziert werden. Diese Passpunkte können von geübten Bearbeitern mit ca. 0.5-2 Pixel Genauigkeit (0.2 m - 1 m) im Bild referenziert werden. Mit derselben Genauigkeit können auch die Transmitterpunkte bestimmt werden. Die letzte Fehlerquelle ist das Aufstellen der Transmitter auf den im Bild ausgewählten Transmitterpunkten. Durch jahreszeitliche und vegetative Veränderung kann es schwierig sein den Transmitterpunkt zu finden. Das Verfahren führt zu einem hohen technischen und finanziellen Aufwand und bringt keine signifikante Steigerung der Genauigkeit gegenüber den GPS-Messungen.

6.2 Empfängerpositionsalgorithmen

6.2.1 Grundlagen

Die Empfänger-Position wird aus den Strecken, in diesen Fall Pseudostrecken und dem Barometerstand berechnet. Grundsätzlich kann man die Berechnungen in folgende Methoden unterteilen:

1. Time of Arrival 2D (**Toa2**)
2. Time Difference of Arrival 2D (**Tdoa2**)
3. Time of Arrival 3D (**Toa3**)
4. Time Difference of Arrival 3D (**Tdoa3**)

Für die 3D Positionierung werden zur Berechnung der Höhe die Informationen aus dem Barometer verwendet. Die Höhe kann durch die schlechte Geometrie (Transmitter in einer Ebene bzw. auf gleicher Höhe) nur schlecht aus den Pseudostrecken geschätzt werden. Durch die relative Luftdruckmessung zwischen dem Empfänger und dem Transmitter 4 kann der Höhenunterschied zwischen dem Transmitter und dem Empfänger abgeleitet werden.

Pro Sekunde werden 20 Messungen von den Transmittern zum Empfänger durchgeführt, dabei hat jede Epoche einen eigenen Uhrenfehler. Die Berechnungen werden in einem lokalen Horizontsystem durchgeführt, bei welchem der erste Transmitter den Koordinatenursprung bildet. Bei dem ursprünglichem Algorithmus wird pro Epoche eine Empfängerposition ohne Gewichtung berechnet. Zur Erhöhung der Genauigkeit ist ein RAIM-Verfahren in dem Algorithmus integriert, welches fehlerhafte Streckenmessungen aus der Berechnung entfernt.

Bei dem neuen Berechnungsansatz wird eine Gewichtung und ein Ausreißertest hinzugefügt. Weiters werden zur Berechnung einer Empfängerposition, mehrere Epochen verwendet. Da es keine Informationen über die Standardabweichungen der einzelnen Pseudostrecken gibt wird die Gewichtung über S/N-Informationen durchgeführt. Negative S/N-Werte werden dabei nicht vernachlässigt. Durch Dämpfung und Reflexionen und daraus resultierenden niedrigen S/N-Werten besitzen die Positionen eine große Streuung. Zurzeit wird diese Streuung mittels RAIM-Verfahren und einer Filterung der Positionslösung kompensiert. Folgend werden die Bestandteile zu einem neuen verbesserten alternativen Ansatz zur Positionsbestimmung des Empfänger beschrieben:

1. **Erweitertes Ausgleichsmodell:** Anstatt eine einzelne Epoche auszuwerten, werden mehrere Epochen zusammen ausgeglichen. Dadurch steigt der Grad der Überbestimmung. Beschrieben wird die Berechnung ab dem Zeitpunkt in dem die Pseudorange aus dem Signal geschätzt wurden. Ansatz für die Berechnung ist ein Ausgleich über mehrere Epochen kombiniert mit einem Ausreißertest.

Im Ausgleich werden im 2D-Fall die X-Koordinate, die Y-Koordinate und pro Epoche ein Uhrenfehler geschätzt. Für den funktionalen Zusammenhang gilt:

$$\rho_{ik}^j = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} + \delta^j \quad (6.1)$$

**Hochgenaue ad-hoc
Positionsbestimmung mit GNSS**

$j \dots$ Epoche
 $i \dots$ Transmitter
 $k \dots$ Receiver
 $\delta \dots$ Uhrenfehler [m]

Der nichtlineare Zusammenhang muss linearisiert, daher die Funktion nach den Unbekannten abgeleitet werden. Man erhält folgende Differentiale:

$$\frac{\partial \rho}{\partial x_k} = \frac{x_k - x_i}{\sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2}} \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial y_k} = \frac{y_k - y_i}{\sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2}} \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \delta} = 1 \quad (6.4)$$

Somit erhält man folgende Designmatrix:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_{1k}^1}{\partial x_k} & \frac{\partial \rho_{1k}^1}{\partial y_k} & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \rho_{ik}^j}{\partial x_k} & \frac{\partial \rho_{ik}^j}{\partial y_k} & \dots & \dots & \frac{\partial \rho_{ik}^j}{\partial \delta t^j} \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Als Gewichtung werden die S/N-Werte verwendet. Hierzu gibt es mehrere Ansätze, wobei die zwei Wichtigsten hier erklärt werden:

(a) **Gewichtung mit Exponenten**

$$p_{ii} = \begin{cases} SN_i^h & \text{falls } \min(SN) > 0 \\ (|\min(SN)| + SN_i)^h & \text{falls } \min(SN) \leq 0 \end{cases} \quad (6.6)$$

Somit kann auch mit negativen S/N-Werten gewichtet werden, was sich als gut erwiesen hat. h ist ein frei wählbarer Faktor wobei $h = 0.5$ die besten Ergebnisse liefert.

(b) **Gewichtung mittels dB \rightarrow magnitude**

$$p_{ii} = 10^{\frac{SN_i}{20}} \quad (6.7)$$

Die logarithmischen dB-Werte werden dadurch in lineare Magnituden-Werte transformiert, welche sich besser zur Gewichtung eignen.

Daraufhin kann mit der Ausgleichung begonnen werden. Die dafür bekannten Formeln können aus dem Kapitel 2.3.3 auf Seite 25 entnommen werden.

$$N = A^T P A \quad Q_{xx} = N^{-1} \quad \hat{x} = N^{-1} A^T P l \quad (6.8)$$

$$X = X^0 + \hat{x} \quad v = A\hat{x} - l \quad s_0 = \frac{v^T P v}{f} \quad (6.9)$$

Bei schlechten Näherungskordinaten kann hier durch Iteration eine Verbesserung der Positionslösungen erzielt werden.

2. **Ausreißertest:** Da die Streckenmessung durchaus mit groben Fehlern behaftet sein können wird nach jeder Ausgleichung ein Ausreißertest durchgeführt. Dieser kann auf zwei Arten durchgeführt werden:

- (a) **Mit Verbesserungen v_i :** Einfache Variante, vernachlässigt aber die Redundanzen der Beobachtungen
- (b) **Mit normierten Verbesserungen w_i :** Rechenintensiver durch Bestimmung der Redundanzen und damit verbundenen Q_{vv} Matrix, nimmt jedoch Rücksicht auf die Geometrie und Überbestimmung von Beobachtungen.

$$Q_{vv} = I - A Q_{xx} A^T P \quad w_i = \frac{v_i}{\sigma_0 \sqrt{(q_{vv})_{ii}}} \quad (6.10)$$

Liegen die Verbesserungen über einer bestimmten Schranke $\max(v) > Limit$ wird die Beobachtung mit der größten Verbesserung entfernt. Es erfolgt ein erneuter Ausgleich. Der Test wird solange durchgeführt bis keine der Verbesserungen mehr über der Schranke liegen oder der Freiheitsgrad, welcher sich bei jeder Ausreißerentfernung um 1 verringert zu gering wird (keine Positionslösung).

Nach dem alle Ausreißer entfernt wurden, werden die Pseudorange um den Uhrenfehler korrigiert und man erhält die Strecke. Diese Strecken zeigen einen eindeutigen Bewegungsverlauf welcher sich aus der Bewegung des Transmitters ergibt, aber jedoch auch ein großes Rauschen im Bereich von mehreren Metern. Mit einem gleitenden Mittelwert - Filter wird dieses hochfrequente Rauschen entfernt (siehe Abbildung 53). Mit den geglätteten Strecken wird erneut einmalig eine Position gerechnet.

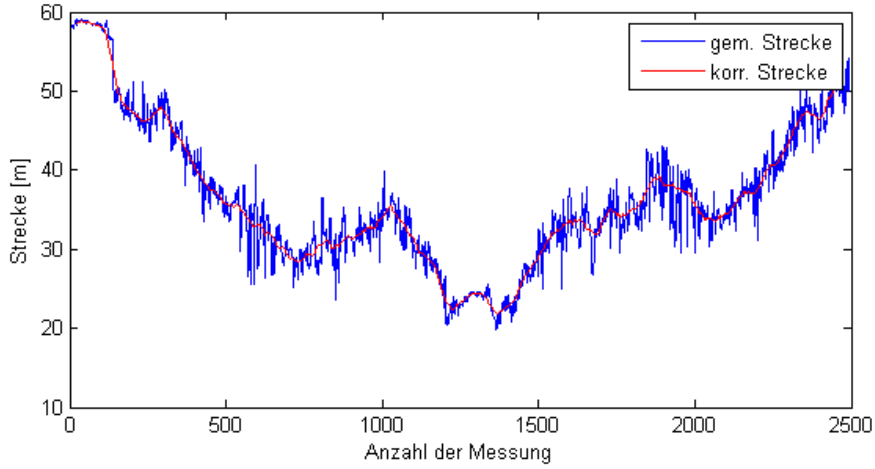


Abbildung 53: Vergleich der Strecken zwischen Transmitter 1 und dem Receiver in Areal 24

3. **Kalmanfilter:** Die Positionslösungen werden mit einem Kalmanfilter (siehe Kapitel 2.4.1 auf Seite 32) geglättet. Dabei werden folgende Parameter verwendet:

$$z = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{pos}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{pos}^2 \end{bmatrix} \quad N = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\Delta t & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\Delta t \end{bmatrix} \quad Q = N \begin{bmatrix} \sigma_{sys}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{sys}^2 \end{bmatrix} N^T \quad (6.12)$$

Und Variablen werden initialisiert mit:

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \tilde{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

Da zurzeit keinerlei zusätzliche Informationen zur Positionslösung wie Geschwindigkeit oder Heading bekannt sind, erfolgt durch den Kalmanfilter keine zusätzliche Verbesserung zu den Positionslösungen, welche mittels gleitenden Mittelwert geglättet wurden. In Zukunft könnte der Kalmanfilter, durch Hinzunahmen von Dead-Reckoning Modulen mehr Bedeutung bekommen.

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

Diese verschiedenen Bestandteile des neuen Ansatzes werden in folgender Art und Weise miteinander verknüpft (siehe Abbildung 54):

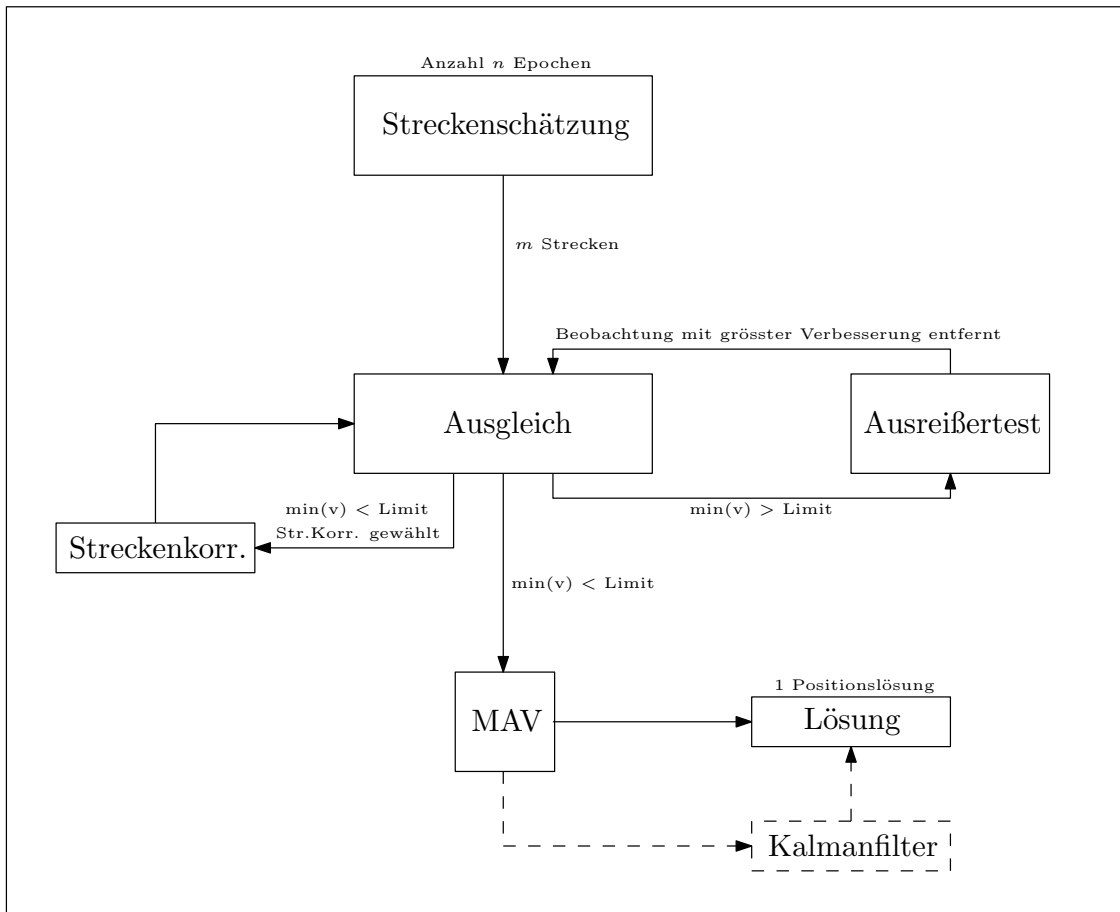


Abbildung 54: Berechnungsablauf des alternativen Algorithmus

Wie zu erkennen gibt es bei der Berechnung verschiedene Optionen und Parameter. Einen besseren Überblick gibt die Oberfläche der MATLAB-Funktion in Abbildung 55. Mit dieser Funktion lassen sich schnell die Lösungen mit unterschiedlichen Parametern berechnen.

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

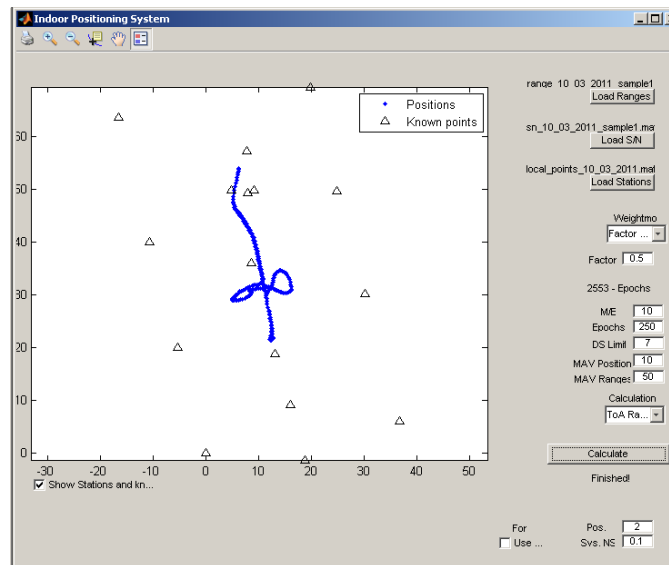


Abbildung 55: Oberfläche der Funktion menugui.m

Die Beschreibung der möglichen Einstellungen ist aus Tabelle 26 zu entnehmen:

Tabelle 26: Funktionserklärung der Auswertungssoftware

Name	Erklärung	Empfohlen
Weightmode	Gewichtungart	Factor w/ negative SN
Factor	Faktor bei der exponentiellen Gewichtung	0.5
M/E	Anzahl der Epochen pro Ausgleich	5 - 10
Epochs	Anzahl der Ausgleichsepochen	$\frac{\text{Epochs}}{M/E}$
DS Limit	Schranke für Ausreißer	5
MAV Position	MAV Fenster nach dem Ausgleich	3 - 10
MAV Ranges	MAV Fenster der Streckenkorrektur	50
Calculation	Art der Berechnung	ToA RangeCorr
Use KF	Benutzung des Kalmanfilters	x
Pos	Positionsgenauigkeit im Kalmanfilter	2
Sys. NS	Systemrauschen im Kalmanfilter	0.1

Ein sehr wichtiger Aspekt, welcher bei der Programmierung des Algorithmus berücksichtigt werden muss, ist die Echtzeitfähigkeit. Die Berechnung darf nicht länger dauern als die Aufzeichnungsrate des Empfängers. Werden zum Beispiel 10 Epochen zur Ausgleichung herangezogen, darf der iterative Algorithmus auf keinen Fall länger als 0.5 Sekunden pro endgültiger Positionslösung benötigen.

Die Verbesserung in den Positionslösungen durch den alternativen Algorithmus ist eindeutig erkennbar. Neben der generell besseren Positionslösung sind die Ergebnisse größtenteils frei von

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

groben Fehlern. Vergleichen kann man die Ergebnisse der Astrium Software (siehe Abbildung 56) mit den Ergebnissen aus den alternativen Ansatz (siehe Abbildung 55). Die Referenz-Trajektorie kann aus Abbildung 20 auf Seite 47 entnommen werden.

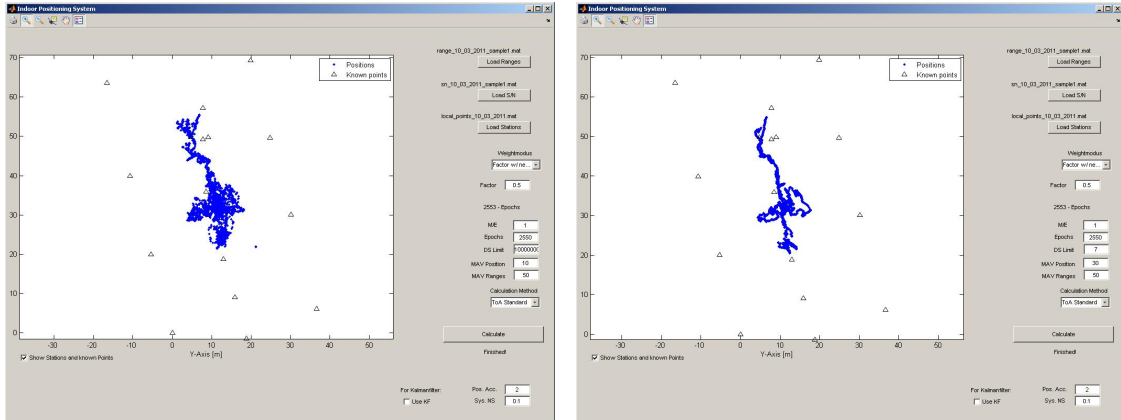


Abbildung 56: Normale Auswertung (links) - Auswertung mit Astrium RAIM-Verfahren (rechts)

6.3 NavWar - Szenarien

Das GPS-Signal wird mit einer Stärke von -160 dBw auf der Erde empfangen. Dies ist vergleichbar mit der Beobachtung einer 25 Watt Glühbirne aus 15000 km Entfernung. Nur durch Code-Korrelation ist es überhaupt möglich das Signal über das Umgebungsrauschen zu heben. Die geringe Empfangsstärke ist auch der Grund wieso das GPS-Signal nicht in Gebäuden bzw. Häuserschluchten empfangen werden kann. Das GPS-Signal besteht zum einen Teil aus dem zivilen unverschlüsselten C/A-Code samt L1/L2/L5 - Träger und dem militärischen verschlüsselten P/Y-Code.

Es soll auf der Welt eine Milliarde GPS-Empfänger geben wobei jedoch 90% davon das Satellitensystem nur zur Synchronisierung und Bestimmung der Zeit verwenden. Im Januar 2007 brach in San Diego in den USA für 2 Stunden Chaos aus. Am Flughafen fiel das Überwachungssystem der Fluglotsen, die Notfallskommunikation des Krankenhauses, das Verkehrsleitsystem des Hafens, das Handynet und die Bankomaten aus. Der Grund für diese Ausfälle war ein Test eines NAVY Schiffes im Hafen, welcher einen Kommunikationsverlust im Kriegsfall simulierte und dabei auch die GPS-Signale störte. Durch diese GPS-Störung entstand neben der nicht-möglichen Positionierung auch ein Ausfall für alle Systeme, welche GPS zur Zeitsynchronisation verwenden. Dies zeigt, dass neben militärischen Zielen durchwegs zivile Unternehmen wie z.B. Banken, Flughäfen durch einen GPS-Ausfall großen Schaden nehmen können. Dieser Aspekt und die Einfachheit GPS-Signale zu stören macht diesen Bereich zu einem immer größer werdenden Risikofaktor. Kommerzielle GPS-Empfänger haben derzeit keinerlei Möglichkeiten Störungen oder Verfälschungen von außen aufzudecken und zu verhindern.

6.3.1 Jamming - Stören

Die Idee ist es den GPS-Empfänger so zu stören, dass es nicht möglich ist die Position zu fixieren. Dies geschieht ganz einfach in dem man auf derselben Frequenz (z.B. 1575.42 MHz für L1 C/A) ein Störsignal aussendet. Üblicherweise ist dieses Störsignal ein Gauß'sches Rauschen mit einer Standardabweichung von 1.023 MHz, da dieses sehr schwer zu filtern ist. Diese Radio-Frequenz-Interferenz (RFI) führt zu einer Störung des Empfängers im Senderadius des Störers. Der Senderadius ist abhängig von der Sendestärke des Störers und ob Gebäude bzw. andere Dämpfer zwischen Störer und Empfänger liegen. Der Senderadius liegt bei ein paar Metern bis hin zu hunderten Kilometer. Bauanleitungen dieser Störer findet man einfach im Internet. Diese sind für handwerklich begabte leicht nachzubauen. Einfacher ist es jedoch sich Störer einfach aus dem Internet zu bestellen (siehe Abbildung 57). Das Benutzen solcher Störer ist strengstens verboten, der Besitz jedoch nicht. [Unb10]

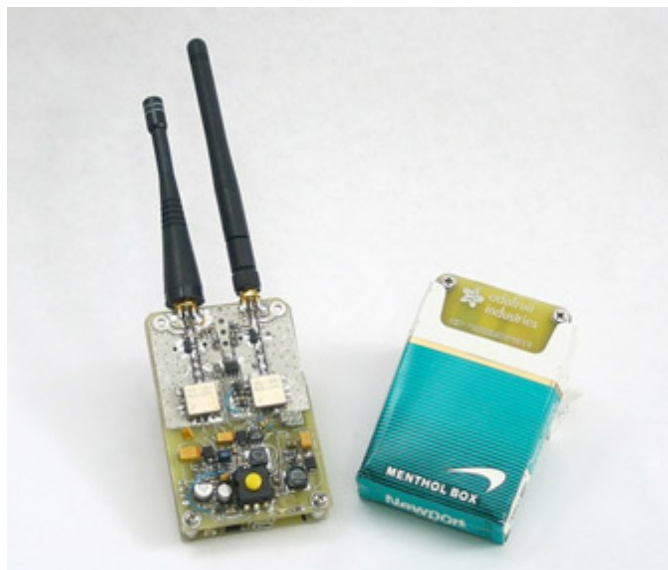


Abbildung 57: GPS-Jammer

Die Störer finden sehr große Verwendung bei Auto- und LKW-Fahrern um die Verfolgung ihres Fahrzeugs durch Dritte zu verhindern. Die Störung von militärischen Empfängern ist ähnlich einfach wie die von zivilen Empfängern. Ein Beispiel dazu liefert ein Vorfall in Griechenland im August 2000. Griechenland wollte für 1.4 Milliarden Dollar 250 Panzer kaufen. Britische, amerikanische, französische und deutsche Panzerproduzenten führten ihre Modelle vor. Während den Vorführungen konnten sich die amerikanischen und britischen Panzer nicht positionieren und somit nicht korrekt navigiert werden. Einige Tage später wurde bekannt, dass eine französische Sicherheitsagentur in der Nähe einen 30 cm hohen Störer aufgebaut hatte und somit den GPS-Empfang der militärischen Maschinen gestört hat.

6.3.2 Spoofing - Verfälschen

Spoofing ist wesentlich komplexer als Jamming, da das GPS-Signal nicht mit irgendeinem Signal gestört werden soll, sondern mit plausiblen GPS-ähnlichen Signalen. Dafür wird zumindest ein GPS-Signalgenerator benötigt, welcher sehr teuer und schwerer zu besorgen ist als ein Jammer. Zusätzlich wird Position des Opfer-GPS-Empfängers benötigt. Da diese meistens nicht bekannt ist, ist es nötig den Spoofer möglichst nahe am Opfer-GPS-Empfänger zu befestigen. Daraufhin misst der Spoofer die korrekten GPS-Signale, verfälscht sie und versendet diese verstärkt. Der Opfer-GPS-Empfänger wird nun mit widersprüchlichen GPS-Signalen (vom Satelliten und vom Spoofer) konfrontiert. Dabei wird er sich für die stärkeren Signale entscheiden, welche aus dem Spoofer kommen. Sobald er eine Position mit den verfälschten Signalen fixiert hat ist der Angriff abgeschlossen (siehe Abbildung 58). Man kann nun den Opfer-GPS-Empfänger jede Position vorgeben die man möchte.

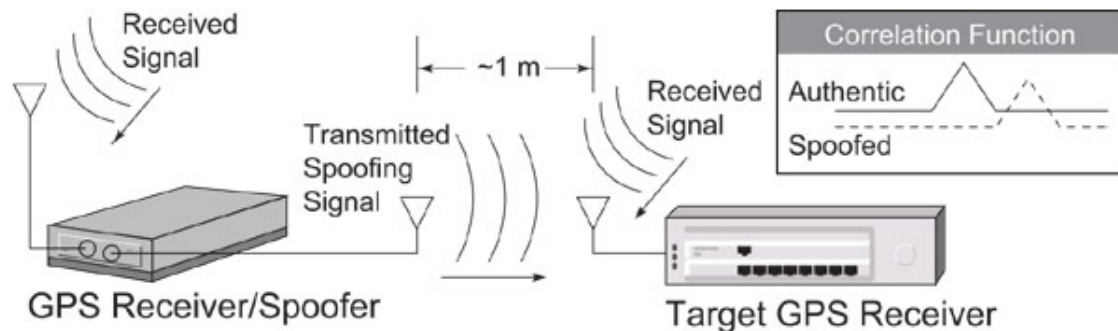


Abbildung 58: Ablauf einer Spoofing-Attacke

Die Abteilung der Homeland Security USA hat im Jahr 2003 Gegenmaßnahmen zum Verhindern von Spoofing-Attacken veröffentlicht, welche sich jedoch in späteren Publikationen als eher nutzlos herausstellten. Im Jahr 2009 wurden erneute Untersuchungen zu Spoofing-Gegenmaßnahmen durchgeführt. Die beste Möglichkeit Spoofing-Attacken zu verhindern sei die Verschlüsselung des zivilen Codes. Da dies jedoch einen unermesslichen Aufwand und Änderungen im GPS-System bedeuten würde wird überlegt die Authentifizierung über das SBAS-Segment durchzuführen. Es gibt allerdings auch weniger aufwendigere und aktuellere Maßnahmen sich gegen Spoofing zu schützen. [Hum09]

- Amplituden-Unterscheidung (Amplitude discrimination)
- Ankunftszeit-Unterscheidung (Time of arrival discrimination)
- Verknüpfung mit Inertialen Messsystemen (IMU cross-check)
- Polarisations-Unterscheidung (Polarization discrimination)

- Ankunfswinkel-Unterscheidung (Angle of arrival discrimination)

Die ersten beiden Verfahren können einfach in die Software jedes Empfängers integriert werden sind jedoch auch leicht zu umgehen. Punkte 3 bis 5 erfordern Hardwareänderungen im Empfänger sind jedoch gegen einfachere Attacken sicher. Die höchste Sicherheit bietet jedoch nur die Verschlüsselung. Somit sind militärische Empfänger dank ihrer Verschlüsselung gegen Spoofing-Attacken resistent. In neuen Studien wurden zwei neue Verfahren entwickelt, welche auch in die Software integriert werden und einfache Attacken verhindern können. [Hum09]

- Daten-Bit-Latenz Abwehr
- Rest-Signal Abwehr

6.3.3 Robuste Empfänger

Da von Jamming und Spoofing für bestimmte Applikationen ein hohes Sicherheitsrisiko ausgeht, beschäftigen sich immer mehr, zum größten Teil, militärische Firmen mit der Entwicklung von speziellen Empfängern, welche resistent(er) gegen böswillige Attacken sein sollen. Beispiele dafür sind Top-Shield von der Firma Thales und GAS-1 von der Firma Raytheon. Weiters arbeitet Boeing zusammen mit der US-Air-Force an einem sicheren Empfänger für Lenkwaffen. Diese Empfänger sind alle sehr teuer und für zivile Nutzer kaum zu bekommen. Der GPS-Empfänger-Hersteller Novatel arbeitet zusammen mit der britischen Firma QinetiQ an einem Empfänger, welcher gegen Störer resistent sein soll. Der Empfänger "Gadget"(GAJT) soll in diesem Herbst auf den Markt kommen und wesentlich billiger als die militärischen Empfänger sein (siehe Abbildung 59).



Abbildung 59: NovAtel GAJT-Empfänger

Er ist für die Verwendung auf Fahrzeugen konzipiert und verwendet eine CRPA ("Controlled Radiation Pattern Antenna") Antenne was dem Verfahren der Ankunftsinkel-Unterscheidung (Angle of Arrival discrimination) entsprechen dürfte. Der GAJT soll ein All-in-One Gerät werden und soll somit Empfänger, Antenne und Zubehör in einem Gerät enthalten. Durch die steigende Abhängigkeit von GPS und die dadurch entstehende Angriffsgefahr wird sehr viel Geld und Zeit in die Entwicklung von Anti-Jam Systemen investiert. Somit kann in Zukunft in diesem Bereich mit vielen neuen Entwicklungen gerechnet werden. [Mur10]

6.3.4 Gefahren für das ILT-System

Das ILT-System ist abhängig von den Positionen der ILT-Transmitter. Können diese nicht bestimmt werden, kann auch für den ILT-Empfänger keine Position berechnet werden. Sind die Koordinaten verfälscht, würden auch die Empfängerkoordinaten verfälscht werden. Eine Jamming-Attacke gegen das aktuelle ILT-System mit Code / L1 - GPS Empfänger wäre sehr einfach. Durch den hohen Senderadius von Jammern könnte mit nur einem Störer alle 8 Transmitter auf einmal gestört werden. Somit wäre das System nicht mehr einsatzbereit. Auf der anderen Seite ist das unbemerkte Spoofen des ILT-Systems als äußerst schwierig anzusehen. Durch die hohe Anzahl der ILT-Transmitter würde eine Spoofing-Attacke auf einen ILT-Transmitter bei allen anderen zu einer Störung führen und damit den Angriff aufdecken. Jeden ILT-Transmitter einzeln zu stören ohne die Restlichen zu beeinflussen dürfte unmöglich sein. Die Verwendung von militärischen Empfängern würde das ILT-System nicht sicherer gegen Störer machen. Die NovAtel GAJT - Empfänger jedoch könnten diese Gefahr vollständig eliminieren.

7 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden folgende Schlussfolgerungen gezogen. Nach empirischer Bestimmung der Streckenmessgenauigkeiten erhält man nach Mittelung eine Messgenauigkeit von etwa 5 Metern. Durch die hohe Anzahl von Messungen und die Mittelung dieser, kann man bei fehlerfreien Transmitterkoordinaten eine Empfängerpositionsgenauigkeit im Bereich von 1 Meter erhalten. Positionsfehler der Transmitter wurden auf der einen Seite mathematisch simuliert und auf der anderen Seite durch absichtliche Verfälschung der Transmitterkoordinaten überprüft. Die Analyse zeigt, dass die Transmitterpositionsgenauigkeiten auf jeden Fall besser als 3 Meter sein sollten um die Empfängerposition nicht zu stark zu verfälschen.

Diese Transmitterpositionsgenauigkeit soll im ersten Schritt ohne zusätzliche Dienste (z.B. SAPOS, APOS) erreicht werden. Die Grundidee ist es eine Netzausgleichung durchzuführen. Die Lagerungspunkte sollen dabei, je nach Qualität der GPS-Messung, eine bestimmte Standardabweichung bekommen, sodass Transmitterkoordinaten mit hoher Genauigkeit auch ein hohes Gewicht in der Lagerung bekommen. Bei der Netzausgleichung wird zwischen drei verschiedenen Geometrien unterschieden. Dem Basislinien-Stern, dem Basislinien-Ring und das Basislinien-Gesamtnetz. Nach Analyse der Vor- und Nachteile der verschiedenen Geometrien zeigt sich, dass die rechenaufwändigste aber dafür auch stabilste Gesamtnetzausgleichung die besten Ergebnisse liefert. Hiermit erreicht man trotz teilweiser schlechter GPS-Positionslösungen eine Gesamtgenauigkeit von 1-2 Meter.

Wichtig ist jedoch auch der zeitliche Aspekt und die Frage inwiefern man die Beobachtungszeit verkürzen kann. Laut Literatur sollten bei Kurzzeitbeobachtungen Zweifrequenz-Empfänger deutlich besser abschneiden. Die praktischen Tests bestätigten diese These und zeigten neben der deutlich genaueren Positionslösung auch kaum Verschlechterungen bei Verkürzung der Beobachtungsdauer. Um die Basislinien von Einfrequenz-Empfänger zusätzlich zu stabilisieren wurde untersucht wie sich zusätzliche Entfernungsmessungen zwischen den Transmittern im Ausgleich auswirken. Diese Strecken könnten aus dem Symeo-Sync-System entnommen werden. Bei kurzen Beobachtungszeiten zeigte sich eine Verbesserung der Lösung bei Verwendung von Symeo-Strecken, da die Einfrequenz-Basislinien bei kurzen Beobachtungszeiten stark fehlerbehaftet sein können. Da das System zurzeit nur aus Einfrequenz-Empfängern besteht und keine Symeo-Streckeninformation verwendet kann die erforderliche Genauigkeit von 1-2 Meter oder besser, besonders bei kurzen Beobachtungen, nicht immer erreicht werden.

Als Alternativen zu der Netzausgleichung wurden weitere Verfahren analysiert. Wide Area Real-time Kinematics (WARTK) würde zu einer Genauigkeit von in etwa 10 cm führen und somit die Anforderungen leicht erfüllen. Jedoch wird hierfür neben Zweifrequenz-Empfängern auch eine große Infrastruktur in Form von Bodenstationen (Funk- und Korrekturdienste) benötigt. Bei Space based augmentation systems (SBAS) wie z.B. EGNOS wäre auch eine Verbesserung der Positionslösungen möglich. Jedoch ist neben dem hohen Abschattungspotential in Städten, auch noch die lokale Abhängigkeit der SBAS-Systeme problematisch. Diese funktionieren nur in ihren lokalen Einsatzbereichen und somit nicht weltweit. Eine weitere Überlegung ist die Positionierung

Hochgenaue ad-hoc Positionsbestimmung mit GNSS

mit Geoinformationssystemen. Hierbei sollen die Transmitter auf Punkte aufgestellt werden, welche auf einer Karte oder einem Orthofoto bestimmt wurden. Leider ist es mit dieser Methode sehr schwer und auch aufwändig eine hohe Genauigkeit der benötigten Transmitterposition zu erreichen. Eine weitere Alternative wäre die Verwendung von militärischen Empfängern (z.B. DAGR) und des Precise Positioning Services (PPS). Klare Vorteile wären hier die höhere Genauigkeit und die Stabilität gegenüber Spoofing. Jedoch ist die Verwendung von PPS-Kryptocodes mit einem logistischen und zeitlichen Aufwand verbunden und nur für militärische Einsätze nutzbar.

Um die hohen Anforderungen zu erfüllen, wäre die optimale Lösung die Transmitter mit zumindest einem Zweifrequenz-Empfänger zu bestücken um die Lagerung und somit die absolute Genauigkeit des Netzes stark zu erhöhen. Für sehr kurze Beobachtungszeiten ($< 5\text{min}$) müssten alle Transmitter mit Zweifrequenz-Empfängern ausgestattet werden. Auch bei den Berechnungsmethoden sollte man generell die Gesamtnetzausgleichung verwenden. Wenn jedoch auch hier der zeitliche Aspekt berücksichtigt werden soll und alle Transmitter mit Zweifrequenz-Empfängern ausgestattet sind, kann auch der Basislinienring verwendet werden und somit die Berechnungsdauer auf wenige Sekunden reduziert werden. Als Alternativen zu den Zweifrequenz-Empfängern könnten theoretisch auch P/Y-Code Empfänger verwendet werden, welche jedoch nicht untersucht wurden.

Durch zukünftige Untersuchungen könnte festgestellt werden inwiefern der neue alternative Empfängerpositionsalgorithmus eine Genauigkeitsverbesserung mit sich bringt. Zusätzlich könnte das System von Geschwindigkeits- und Headinginformationen aus DR-Modulen profitieren. Um das System während der Anwendung sicherer gegenüber Störern zu machen könnten Tests mit dem Novatel GAJT-Empfänger durchaus interessant sein.

Abbildungsverzeichnis

1	Systemskizze RFID Indoor-Positionierungs-System [Met11]	7
2	ILT-Systemarchitektur	9
3	ILT-Systemarchitektur	10
4	Novatel Flexpak V1	11
5	Novatel 701/702-GG	11
6	Aufbau des Empfängers	12
7	Signalstruktur	14
8	Zusammensetzung des Positionierungsfehlers	18
9	Prinzip der Basislinie	18
10	Ablauf des Kalmanfilters	32
11	Einteilung der Testareale	33
12	Astrium-Referenzantennen	35
13	Streckenmessung Transmitter 1 - Areal 24	37
14	ILT Position Accuracy Estimator	40
15	LOP - Gute Geometrie	41
16	LOP - Schlechte Geometrie	41
17	Testpunkte im Areal 24	42
18	Abweichungen der statischen Messung	44
19	Abweichungen der kinematischen Messung	45
20	Punktskizze des Areals 24	47
21	Aktueller Ansatz zur Positionierung	48
22	Basislinien-Stern	51
23	Basislinien-Ring Systemskizze	51
24	Basislinien-Ring	52
25	Basislinien-Gesamtnetz	52
26	Struktur der GPS-Navigationsdaten [Kow09a]	54
27	Programmablauf	56
28	Beispiel einer Berechnung mittels Software	57
29	Transmitterpositionen in Areal 23	61
30	Residuen der absoluten Transmitterpositionen im Areal 23	62
31	Bestpos + Basislinien-Stern Residuen im Areal 23	63
32	Bestpos + Basislinien-Ring Residuen im Areal 23	64
33	Bestpos + Basislinien-Gesamtnetz Residuen im Areal 23	65
34	Bestpos + Basislinien-Ring + Symeo Residuen im Areal 23	66
35	Transmitterpositionen in Areal 5.1	67
36	Residuen der absoluten Transmitterpositionen im Areal 5.1	68
37	Bestpos + Basislinien-Stern Residuen im Areal 5.1	69
38	Bestpos + Basislinien-Ring Residuen im Areal 5.1	70

**Hochgenaue ad-hoc
Positionsbestimmung mit GNSS**

39	Bestpos + Basislinien-Gesamtnetz Residuen im Areal 5.1	71
40	Bestpos + Basislinien-Gesamtnetz + Symeo Residuen im Areal 5.1	72
41	Basislinien-Gesamtnetz der Messepoche 1 im Areal 24	73
42	Basislinien-Gesamtnetz der Messepoche 2 im Areal 24	74
43	Vergleich der Messepoche 1 und der Messepoche 2 im Areal 24	75
44	Residuen bei 10min Beobachtungszeit im Areal 23	76
45	Residuen bei 5 min Beobachtungszeit im Areal 23	77
46	Residuen bei 10min Beobachtungszeit im Areal 5.1	78
47	Residuen bei 5 min Beobachtungszeit im Areal 5.1	79
48	Basisliniengesamtnetz mit unterschiedlichen Empfängertypen im Areal 5.1	80
49	WARTK Systemskizze [Eur06]	83
50	SBAS Netzwerk [Gen10]	84
51	Ultracam XP Crop (http://www.terra-messflug.at)	85
52	Quickbird-2 Crop Bahrain (http://www.digitalglobe.com)	86
53	Vergleich der Strecken zwischen Transmitter 1 und dem Receiver in Areal 24	90
54	Berechnungsablauf des alternativen Algorithmus	91
55	Oberfläche der Funktion <code>menugui.m</code>	92
56	Normale Auswertung (links) - Auswertung mit Astrium RAIM-Verfahren (rechts)	93
57	GPS-Jammer	94
58	Ablauf einer Spoofingattacke	95
59	NovAtel GAJT-Empfänger	96

Tabellenverzeichnis

1	Spezifikationen Novatel Flexpak V1	11
2	Signalinformationen	14
3	GPS-Frequenzen	16
4	Vergleich der Fehlereinflüsse	19
5	Übersicht über die unterschiedlichen Satellitennavigationssysteme	20
6	Datumsdefekte und Datumparameter	30
7	Position der Referenzantenne 1	34
8	Position der Referenzantenne 2	34
9	Streckengenauigkeit TDoA Statisch	36
10	Streckenpräzision - Areal 24	37
11	Streckenpräzision - Areal 23	38
12	Genauigkeit der Transmitterpositionen	42
13	Empfängergenauigkeit für die Testpunkte in Areal 24	43
14	Streckenpräzision - Areal 23	45
15	Streckenpräzision - Areal 23	46
16	Genauigkeit und Kosten von GPS-Empfängern	50
17	Initialisierungsarten	53
18	Beobachtungsdauer und Genauigkeit von relativer Positionierung [HWLW08]	54
19	Mindestbeobachtungszeiten	55
20	uBlox Antaris 4 Genauigkeiten am TU-Campus	58
21	Novatel FlexPak Genauigkeiten im Areal 5.1	58
22	Novatel FlexPak Genauigkeiten im Areal 23	59
23	Empfängertest von Zweifrequenz-Empfängern am TU-Campus	59
24	Empfängertest von Zweifrequenz-Empfängern im Areal 5.1	59
25	Verkürzung der Beobachtungszeit aller Empfänger	60
26	Funktionserklärung der Auswertungssoftware	92

Literatur

- [BW08] Fritz Brunner and Andreas Wieser. *Skriptum: Ingenieurgeodäsie*. Fritz Brunner, 2008.
- [Dep08] Departement of Defense. *GPS Standard Positioning Service Performance Standard*. 2008.
- [Eur06] European GNSS - Academy. *WARTK based on EGNOS and Galileo: technical feasibility study*. 2006. www.gsa.europa.eu/go/projects/wartk-based-on-egnos-and-galileo-technical-feasibility-study.
- [Gen10] GeneQ Inc. *SBAS Coverage Area*. 2010. www.geneq.com.
- [Gla96] Hans Glasmacher. *Zentimeter-Genauigkeit in der Geodäsie*. 1996.
- [HP10] Manuel Hernandez-Pajarez. *Wide-Area RTK*. 2010.
- [Hum09] Todd Humphreys. *Assessing the Spoofing Threat*. 2009.
- [HWLW08] Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, and Wasle. *GNSS - Global Navigation Satellite Systems*. Springer, 2008.
- [Kow09a] Kowoma. *Aufbau des Datensignals*. 2009. www.kowoma.de/gps/Signalaufbau.htm.
- [Kow09b] Kowoma. *WAAS and EGNOS*. 2009.
- [LSD06] Binghao Li, James Salter, and Andrew Dempster. *Indoor Positioning Techniques Based on Wireless LAN*. 2006. www.gmat.unsw.edu.au/.
- [LWH11] Wilfried Ley, Klaus Wittmann, and Will Hallmann. *Handbuch der Raumfahrttechnik*. Hanser, 2011.
- [Met11] MetraTec. *Produktbereich "Lokalisierung"(Indoor-Positioning-System)*. 2011. www.metratec.com/de/produkte/lokalisierung-ips.html.
- [Mur10] Tony Murfin. *Affordable Anti-Jam Technology*. 2010.
- [Nie08] Wolfgang Niemeier. *Ausgleichsrechnung - Statistische Auswertemethoden*. de Gruyter, 2008.
- [Pai07] Roland Pail. *Skriptum: Parameterschätzung*. Roland Pail, 2007.
- [SPNM10] Schmitz-Peiffer, Nuckelt, and Middendorf. *A new Navigation System for Indoor Positioning*. 2010.
- [Unb10] Unbekannt. *Bauanleitung GPS-Jammer*. 2010. www.entropia.de.
- [WK10] Manfred Wieser and Norbert Kühtreiber. *Skriptum: Navigation Systems*. Manfred Wieser and Norbert Kühtreiber, 2010.