

Präzise Positionierung mit Einfrequenz-Empfängern unter Nutzung der Potenziale des Galileo E5 AltBOC (15, 10)-Breitband-Signals

Dissertation

eingereicht von

Dipl.-Ing. Toho Herman Diessongo

Vollständiger Abdruck der an der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) eingereichten Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Wünsche

1. Berichterstatter: Privatdozent Dr.-Ing. habil. Torben Schüler

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann

Die Dissertation wurde am 18 März 2013 bei der Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, D-85577 Neubiberg eingereicht

Tag der mündlichen Prüfung: 11 Dezember 2013

Zusammenfassung

In der wissenschaftlichen Gemeinschaft ist derzeit die Denkweise verbreitet, dass präzise Positionierung lediglich mit Trägerphasenmessungen auf zwei oder mehreren Frequenzen realisierbar sei. Diese Annahme lässt sich auf folgende Tatsachen zurückführen: Zum einen, dass die ionosphärische Laufzeitverzögerung (als größte Fehlerquelle) durch die Verwendung von mindestens zwei Frequenzen eliminiert werden kann, zum anderen, dass Trägerphasenmessungen bei weitem genauer sind als Codestreckenmessungen, da sie weniger von Messrauschen und Mehrwegeeffekten beeinflusst sind.

Dennoch kann die Einfrequenz-Positionierung mit der Einführung neuer GNSS (Galileo und COMPASS/BeiDou) und der Verfügbarkeit neuer Signale signifikant verbessert werden. Unter diesen vielen Innovationen sollte dem Galileo E5-Breitband-Signal besondere Aufmerksamkeit beigemessen werden. Seine einzigartigen Eigenschaften, darunter seine nominale Bandbreite von ca. 90 MHz (offizielle Bandbreite 51 MHz) und die AltBOC (15, 10) Modulation, ermöglichen eine erhebliche Steigerung der Genauigkeit von E5 Codestreckenmessungen sowohl im Hinblick auf reduziertes Codemessrauschen sowie auf die Mitigation der Multipath-Einflüsse, die bekanntlich kritische Merkmale bei der Genauigkeit von Codemessungen darstellen. Obwohl es eine technische Herausforderung ist, einen Galileo E5-Einfrequenz-Empfänger zu implementieren, könnte ein solcher die Genauigkeitslücke zwischen den herkömmlichen Einfrequenz- und Zweifrequenz-Empfängern (mit GPS L1) füllen. Hiervon könnte eine Vielzahl wissenschaftlicher und nicht-wissenschaftlicher Anwendungen im GNSS Positionierungsbereich profitieren.

In der Tat kann eine auf der Einfrequenz-Positionierungsmethode basierende additive Kombination von Codestrecken- und Trägerphasenmessungen (sog. –„Code-plus-Carrier (CPC)“-Methode) die ionosphärische Laufzeitverzögerung eliminieren und somit präzise Positionsergebnisse mit Galileo E5-Einfrequenz-Daten über lange Distanzen erzeugen. Da die troposphärische Laufzeitverzögerung immer noch die Positionierungsgenauigkeit beeinträchtigen kann – sie kann aufgrund ihrer nicht-dispersiven Eigenschaften nicht vom CPC-Fehlerbudget eliminiert werden – , können entweder präzise externe Korrekturquellen (wie z.B. numerische Wettermodelle) oder zusätzliche troposphärische Verzögerungsparameter in der Prozessierung verwendet werden. Multipath-Effekte sind ortsspezifisch und beeinflussen die Codestreckenmessung am stärksten, weswegen sie in einigen Fällen mitigiert werden müssen.

Die Galileo E5 CPC-Positionsergebnisse liefern unter Verwendung von relativen Positionierungsmethoden Genauigkeiten von 2 bis 5 cm über Basislinienlängen bis zu 1000 km nach einer Konvergenzzeit von etwa drei Stunden. Die lange Konvergenzzeit resultiert aus der Tatsache, dass die abgeleiteten CPC-Beobachtungsgrößen Mehrdeutigkeitsterme als zusätzliche Unbekannte enthalten. Dies erfordert im Regelfall eine längere Beobachtungszeit, um eine ausreichende Konvergenz der Parameter zu erzielen. Deshalb soll versucht werden, den Mehrdeutigkeitsterm durch herkömmliche Methoden wie z.B. die LAMBDA (Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment)-Methode, aufzulösen. Die Anwendung der LAMBDA-Methode bei der Galileo E5-CPC-Prozessierung ermöglicht es, die Mehrdeutigkeit innerhalb von 20 min zu fixieren und dann liefern die Positionsergebnisse die übliche Genauigkeit (2-5 cm).

Jedoch benötigen bestimmte Anwendungen eine schnelle Bereitstellung der Positionsergebnisse, d.h. die geforderte Positionsgenauigkeit im Zentimeter-Bereich soll in Echtzeit oder nahezu Echtzeit (30 s bis 15 min) geliefert werden. Aus diesem Grund wird eine sogenannte „Rapid Convergence Filter (RCF)“-Methode basierend, auf der Kalman-Filterung

neben dem konventionellen CPC-Ansatz implementiert. Die RCF-Methode prozessiert parallel Code- und Trägerphasenmessungen, um die Mehrdeutigkeitsterme innerhalb von ein paar Minuten über Basislinienlängen von ca. 10 km festzusetzen und Positionsergebnisse im Subdezimeter-Bereich zu liefern. Die ionosphärische Laufzeitverzögerung kann dabei als zeitabhängige Funktion geschätzt werden. Auch externe Unterstützung, wie IONEX-Karten oder GNSS aktive Netzwerke, können zu Hilfe kommen, um eine rasche Konvergenz der Positionsparameter zu erhalten.

Alle Ergebnisse in dieser Arbeit basieren lediglich auf simulierten Daten, da die geplante volle Galileo-Konstellation erst im Jahr 2020 abgeschlossen sein wird und zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit für die Berechnung von Positionen mit echten Galileo E5-Daten nicht ausreicht.

Abstract

Common sense in the scientific community teaches that accurate GNSS positioning results essentially require dual-frequency receivers with a preferred use of carrier phase measurements for precise positioning applications. This way of thinking is primarily motivated by the fact that the (first order) ionospheric delay can be eliminated by use of at least two frequencies, and carrier phase measurements are less affected by multipath effects than range measurements. Therefore, development efforts are emphasized on multi-frequency receivers and positioning techniques, because future GNSS like GALILEO will offer even more than two open carrier signals. The drawback of the use of multi-frequency GNSS receivers is the expensive cost for their acquisition.

Single-frequency positioning can undoubtedly be improved with the deployment of new GNSS and the availability of new signals. Among various innovations, the Galileo E5 broadband signal should receive a special attention. Its unique features including its nominal bandwidth of about 90 MHz (official bandwidth 51 MHz) and the AltBOC (15, 10) modulation scheme allow to drastically boost the code range precision, both in terms of reduced code noise as well as with respect to multipath mitigation which is a critical point. Although there are technical challenges regarding the implementation of a single-frequency E5 receiver, such a device could be produced at lower costs compared to currently available dual-frequency devices, and certain scientific and non-scientific applications in the positioning domain could likely benefit from this.

A positioning approach, based on an additive combination of code range and carrier phase measurements (CPC – “code-plus-carrier”), which eliminates the ionospheric delay could be used to process Galileo E5 single-frequency data and perform precise positioning over long distances. Since tropospheric delays can still compromise the positioning accuracy – the tropospheric delay cannot be eliminated from the CPC-error budget due to its non-dispersive characteristic – either external sources providing precise corrections (e.g. numerical weather models) can be used or the injection of additional tropospheric delay parameters into the estimation process is necessary. Multipath errors are site-specific and stronger on the code ranges and will require to be mitigated in some cases.

The Galileo E5 CPC-based results yield a positioning precision of 2 to 5 cm after a convergence time of about 3 h. The long convergence time is due to the fact that the derived observable contains an ambiguity term as an additional unknown which normally requires longer observation windows in order to allow sufficient convergence of the parameters. Therefore one should try to fix this term by using common ambiguity resolution techniques like the LAMBDA-method. Applying the LAMBDA-method to the Galileo E5 CPC-processing can fix the ambiguity term within 20 min and the positioning results deliver the required accuracy (2-5 cm).

Nevertheless, certain applications require a very quick time to first fix, i.e. the precise position should be delivered in real or near real time (30 s to 15 min). For this reason, a so called „rapid convergence algorithm“ based on Kalman filtering was implemented in addition to the conventional CPC approach. The „rapid convergence algorithm“ jointly processes range and phase observations in order to fix the ambiguity terms within a few minutes and the obtained position results are at the sub-decimeter level. The ionospheric propagation delays can be estimated as a function varying in time domain, but external aiding, such as IONEX Maps or active GNSS networks will be necessary to obtain a rapid convergence against a precise coordinate.

All results in this study are based on simulated data, because the current Galileo constellation, which is going to be completed by 2020, is not yet sufficient for real-world positioning trials.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINFÜHRUNG	1
1.1	EINLEITUNG ZUM THEMA PRÄZISE POSITIONIERUNG MIT EINFREQUENZ-SIGNAL-EMPFÄNGERN.....	1
1.2	ENTWICKLUNGSSTAND VON GALILEO.....	2
1.3	BEDEUTUNG VON COMPASS/BEIDOU.....	5
1.4	LÖSUNGSANSATZ FÜR PRÄZISE EINFREQUENZ-POSITIONIERUNG MIT E5.....	7
1.5	VORHANDENE WISSENSCHAFTLICHE ERKENNTNISSE IM BEREICH DER PRÄZISEN EINFREQUENZ-POSITIONIERUNG.....	9
1.6	ZIELSETZUNG UND GLIEDERUNG DER ARBEIT.....	9
2	ALGORITHMEN DER PRÄZISEN POSITIONIERUNG MIT GALILEO E5	11
2.1	DAS E5 ALTBOC (15,10)-SIGNAL: DER SCHÜSSEL ZUR PRÄZISEN EINFREQUENZ-POSITIONIERUNG.....	11
2.1.1	Technische Herausforderung bei der Entwicklung eines Galileo E5-Empfängers.....	15
2.1.2	AltBOC Signal-Prozessierung.....	16
2.1.3	AltBOC-Prozessierung durch ein Breitband-Frontend („Single Band“-Prozessierung) ..	17
2.1.4	AltBOC-Prozessierung durch ein duales Frontend.....	19
2.1.5	Die Herausforderung der AltBOC-Prozessierung.....	20
2.2	ALLGEMEINES ZUR GNSS-POSITIONIERUNG.....	21
2.2.1	Die Beobachtungsgrößen.....	21
2.2.2	Positionsbestimmung.....	24
2.3	DIE IONOSPHERE ALS GRÖßTE HÜRDE ZUR PRÄZISEN POSITIONIERUNG.....	28
2.3.1	Die Ionosphäre.....	28
2.3.2	Die ionosphärische Refraktion auf das E5-Signal.....	29
2.4	CODE-PLUS-CARRIER (CPC)-METHODE.....	32
2.4.1	Die Methodologie.....	33
2.4.2	Eigenschaften der neuen Beobachtungsgleichung CPC.....	35
2.5	PROZESSIERUNGSABLAUF.....	36
2.5.1	DGNSS-Lösung.....	39
2.5.2	Zeitliche Inkrementation der Trägerphasenlösung.....	41
2.5.3	PDGNSS-Blockausgleichung der CPC-Lösung.....	43
2.5.4	PDGNSS-Einzelepochen-Lösung der CPC-Beobachtungen.....	45
2.6	„RAPID CONVERGENCE FILTER“-ANSATZ.....	46
2.6.1	Die Filterungsschritte.....	47
2.6.2	Initialisierung des Filters.....	52
2.7	MEHRDEUTIGKEITSLÖSUNG DER CPC-BEOBACHTUNG.....	52
2.7.1	Geometriefreie Mehrdeutigkeitslösung.....	53
2.7.2	Geometriebasiertes Verfahren.....	57
2.7.3	Geometriereduziertes Verfahren.....	60
2.7.4	Kombinationsverfahren zur schnellen Mehrdeutigkeitslösung.....	61

3	FEHLERBETRACHTUNG	65
3.1	BERÜCKSICHTIGUNG DER FEHLEREINFLÜSSE IM PROZESSIERUNGSMODELL	65
3.2	FEHLEREINFLÜSSE	68
3.2.1	Das Messrauschen von Code- und Trägerphasenmessungen	68
3.2.2	Antennenfehler	70
3.2.3	Phasensprünge („Cycle Slips“)	73
3.2.4	Mehrwegeeffekte (Multipath)	74
3.2.5	Relativistische Effekte	80
3.2.6	Modellierung der Koordinatenänderung (Bewegungskorrektur)	80
3.2.7	Gezeiten der festen Erde	82
3.2.8	Ozeanische Auflasten	83
3.2.9	Erdrotations-Parameter	84
3.2.10	Satellitenbahnfehler	84
3.2.11	Atmosphärische Resteffekte	87
3.3	BEOBACHTUNGS- UND KOORDINATENGLEICHUNG	95
4	ANWENDUNGSBEREICHE UND TESTBESCHREIBUNGEN	97
4.1	GENAUIGKEITSERWARTUNGEN	97
4.2	NETZ-ZUGANG	98
4.3	RELEVANTE APPLIKATIONEN UND IHRE GENAUIGKEITSANFORDERUNGEN	99
4.3.1	Gesamtschau der Applikationen	100
4.3.2	Anforderungen an die präzise Positionierung	101
4.3.3	Anforderungen an die Detektion von Positionsänderungen	102
4.3.4	Andere spezielle Anwendungen	103
4.4	TESTSZENARIEN-BESCHREIBUNGEN	105
4.4.1	Testszenarien für die präzise Positionierung	105
4.4.2	Testszenarien für die präzise Positionierung	107
4.4.3	Bestimmung von Positionsänderungen	108
5	DATENSIMULATION UND -VERIFIZIERUNG	113
5.1	ALLGEMEINE BESCHREIBUNG DER SIMULATION	113
5.1.1	Berechnungsschritte der Simulation	115
5.1.2	Simulation der Satellitenbahndaten	116
5.1.3	Modellierung der Fehlereinflüsse auf die Simulation	118
5.2	GENERIERUNG DER SIMULIERTEN DATEN	123
5.2.1	Überprüfung der simulierten Daten mit einer unabhängigen Software	123
5.2.2	Ergebnisse der Datenverifikation	126
6	ANALYSE DER GALILEO E5-EINFREQUENZ-POSITIONIERUNG	127
6.1	ANALYSEABLAUF	127
6.2	ANALYSE DER POSITIONSERGEBNISSE	129
6.2.1	Anpassung des stochastischen Modells	129
6.2.2	Analyse der Galileo E5 und GPS L1-CPC-Ergebnisse	132
6.2.3	Analyse der Galileo E5 und GPS L5-CPC-Ergebnisse	136
6.2.4	Code-Plus-Carrier-Methode vs. Trägerphasenprozessierung	138

6.2.5	Mehrwegeeinflüsse.....	141
6.2.6	Mehrdeutigkeitslösung mit Suchalgorithmen.....	144
6.3	BASISLINIENABHÄNGIGE LANGZEITANALYSE.....	146
6.3.1	Einfrequenz-Positionierung über kurze Basislinien	147
6.3.2	Einfrequenz-Positionierung über mittellange Basislinien	149
6.3.3	Einfrequenz-Positionierung über lange Basislinien	151
6.4	EINSATZ VON CPC WÄHREND DES GALILEO-AUFBAUS	154
6.4.1	Reduzierte Galileo-Satellitenkonstellation	155
6.4.2	Reduzierte Konstellation aus Galileo- und GPS-Satelliten	158
6.4.3	Multi-Konstellationslösung (Galileo + COMPASS/BEIDOU).....	160
6.5	RCF-POSITIONSERGEBNISSE.....	163
6.5.1	Experiment 1: Kurzes Basislinien-Testszenario.....	164
6.5.2	Experiment 2: Mittellange Basislinie	167
6.6	ANWENDUNGSFALL DER EINFREQUENZ-POSITIONIERUNG	174
6.6.1	Überwachung von Blockgletschern.....	174
6.6.2	Seismische Punktverschiebung: Erdbeben im März 2011 in Japan	178
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	183
7.1	ERGEBNISSE	183
7.2	EINSCHRÄNKUNGEN UND AUSBLICK	184
7.3	SCHLUSSBEMERKUNGEN.....	185
8	REFERENZEN.....	187
9	DANKSAGUNG	195

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1-1: Galileo-Konstellation bestehend aus 30 Satelliten	3
Abbildung 1-2: Galileo Implementierungsplan nach der European GNSS Agency, 2012	3
Abbildung 1-3: Schematische Darstellung der Signaldefinition von Galileo	4
Abbildung 1-4: Lösungsansatz zur präzisen Einfrequenz-Positionierung	7
Abbildung 2-1: Darstellung des Spektrums von E5	11
Abbildung 2-2: Streckenmessrauschen von ausgewählten Galileo-Signalen (E1 und E5)	13
Abbildung 2-3: Codestrecken-Multipath-Fehler von verschiedenen Signalen	14
Abbildung 2-4: Breitband-Frontend-Signal-Prozessierung von Galileo E5 AltBOC	18
Abbildung 2-5: AltBOC-Prozessierung mit einem S/W-Empfänger	19
Abbildung 2-6: Absolute Positionierung	25
Abbildung 2-7: Doppeldifferenz-Bildung	27
Abbildung 2-8: Aufbau der Ionosphäre	29
Abbildung 2-9: SGSS eXpert-Benutzeroberfläche	37
Abbildung 2-10: Prozessierungsschritte für die Galileo E5-CPC-Positionierungsmethode	38
Abbildung 2-11: Darstellung der Suchellipse der LAMBDA-Methode	59
Abbildung 2-12: Darstellung der Lösungsketten zur Bestimmung der Mehrdeutigkeiten	62
Abbildung 3-1: Tracking-Rauschen verschiedener Codestreckenmessungen	69
Abbildung 3-2: mittlere Antennenoffsets (PCO) und Phasenzentrumsvariationen	71
Abbildung 3-3: Multipatheffekte	75
Abbildung 3-4: Vergleich von Code-Multipath-Fehlerumhüllungen	76
Abbildung 3-5: Trägerphasen-Multipath-Fehlerumhüllung	76
Abbildung 3-6: Glättung von Code-Multipath unter Nutzung verschiedener Zeitkonstanten (s)	78
Abbildung 3-7: Zeitreihen von ZPD (mm) des Standorts Brüssel (BRUS)	91
Abbildung 3-9: Numerisches Wettermodell sowie daraus abgeleitete Produkte	94
Abbildung 4-1: zu erwartende Genauigkeiten der beiden E5-Einfrequenz-Positionierungsansätze	97
Abbildung 4-2: aus IGS-/EUREF-Stationen bestehendes Hauptnetz	105
Abbildung 4-3: BFCORS-Netz in Burkina Faso	107
Abbildung 4-4: Netzaufbau für die Dirru-Blockgletscher-Beobachtung	109
Abbildung 4-5: Jährliche durchschnittliche Geschwindigkeiten von Blockgletschern	110
Abbildung 5-1: Simulationsmodul der Software „NEREUS“	113
Abbildung 5-2: Konfigurationsparameter zur Generierung von simulierten Beobachtungsdaten	114
Abbildung 5-3: Orientierung einer Satellitenbahn, beschrieben durch Kepler-Parameter	116
Abbildung 5-4: Berechnete Koeffizienten durch die Fourier-Analyse	120
Abbildung 5-5: Darstellung des ionosphärischen Subpunktes	120
Abbildung 5-6: Simulationsparameter der TID	121
Abbildung 5-7: Simulationsparameter der troposphärischen Störung	122
Abbildung 5-8: Funktionales Flussdiagramm der Standardprozessierung der Bernese-Software	124
Abbildung 5-9: Bernese-Applikation ADDNEQ2	125
Abbildung 5-10: Netz im mittleren Breiten-Bereich (links) und in der Polregion (rechts)	125
Abbildung 6-1: Prozessierungskonfiguration mit „SGSS eXpert“	129
Abbildung 6-2: Vergleich von simulierten und realen GPS L1-Daten	132
Abbildung 6-3: Vergleich der CPC-Ergebnisse aus verschiedenen langen GPS L1- und Galileo E5-Datensätzen	133
Abbildung 6-4: Galileo E5-CPC-Positionsfehler	134
Abbildung 6-5: GPS L1-CPC-Positionsfehler	134
Abbildung 6-6: Punktstreuung der Galileo E5 und GPS L1-CPC-Ergebnisse	135
Abbildung 6-7: Galileo E5-CPC-Positionsfehler	137
Abbildung 6-8: L5-CPC-Positionsfehler	137
Abbildung 6-9: CPC-Ergebnisse (3D RMS) aus GPS L1, L5 und Galileo E5	138
Abbildung 6-10: Vergleich der Positionsgenauigkeiten von Trägerphasenprozessierung und Galileo E5-Einfrequenzprozessierung (CPC)	139
Abbildung 6-11: Galileo E5-CPC-Positionsfehler	140
Abbildung 6-12: GPS L1+L5 Trägerphasen-Positionsfehler	140

Abbildung 6-13: Vergleich der CPC-Positionierungsergebnisse aus verschiedenen Umgebungen	142
Abbildung 6-14: Vergleich der Punktstreuungen von Galileo E5-CPC-Positionierungsergebnisse im offenen Gelände (grüne Punkte) und denjenigen im städtischen Bereich (blaue Punkte).....	143
Abbildung 6-15: Vergleich der Punktstreuungen von Galileo E5-CPC-Positionierungsergebnissen im offenen Gelände (grüne Punkte) mit GPS L1-CPC-Positionierungsergebnissen im städtischen Bereich (blaue Punkte)	143
Abbildung 6-16: CPC-Prozessierungsschritte zur Lösung der Mehrdeutigkeit	145
Abbildung 6-17: Galileo E5-CPC-Positionierungsergebnisse mit Mehrdeutigkeitsfixierung; die Abbildung ist im Sinne einer besseren Lesbarkeit logarithmisch skaliert.....	146
Abbildung 6-18: Kurze Basislinien-Prozessierungsanordnung.....	147
Abbildung 6-19: Verteilung der CPC-Positionsfehler	148
Abbildung 6-20: Mittellange Basislinien-Prozessierungsanordnung.....	149
Abbildung 6-21: Verteilung der CPC-Positionsfehler für mittellange Basislinien-Positionierung	150
Abbildung 6-22: lange Basislinien-Prozessierungsanordnung.....	152
Abbildung 6-23: Verteilung der CPC-Positionsfehler für lange Basislinien-Positionierung.....	153
Abbildung 6-24: Analyse der Sichtbarkeit und Geometrie der Satelliten aus der reduzierten Galileo- Konstellation.....	156
Abbildung 6-25: Die CPC-Positionierungsergebnisse bei reduzierter Galileo-Satellitenkonstellation	157
Abbildung 6-26: Punktstreuung der Galileo E5-CPC-Positionierungsergebnisse aus der reduzierten Satellitenkonstellation	157
Abbildung 6-27: Analyse der Sichtbarkeit und Geometrie der Satelliten aus der reduzierten Galileo- Konstellation.....	159
Abbildung 6-28: CPC-Positionierungsergebnisse bei Kombination von Galileo E5- und GPS L5-Daten während der IOC-Phase.....	160
Abbildung 6-29: COMPASS-Frequenzplan, GUCANG [2011]	160
Abbildung 6-30: Spektrumsanalyse des B2-Signals, GUCANG [2011].....	161
Abbildung 6-31: Analyse der Sichtbarkeit und Geometrie der Satelliten aus der reduzierten Galileo- Konstellation.....	162
Abbildung 6-32: CPC-Positionierungsergebnisse aus der Kombination von Galileo E5- und COMPASS-B2-Daten während der FOC-Phase	163
Abbildung 6-33: Kurze Basislinie auf dem Gelände der UniBwM zwischen 4110 (Dach eines Gebäudes) und 6208 (Messpfeiler) zum Testen der RCF-Methode	164
Abbildung 6-34: RCF-Positionsergebnisse unter Verwendung von Galileo E1-Messungen.....	165
Abbildung 6-35: Konvergenz der Position (X-Komponente) unter Verwendung von Galileo E1- Messungen; Vergrößerung der Abbildung 6-34 (erste Minute der Beobachtung)	166
Abbildung 6-36: RCF-Positionsergebnisse unter Verwendung von Galileo E5-Messungen.....	166
Abbildung 6-37: Konvergenz der Position (X-Komponente) unter Verwendung von Galileo E5- Messungen; Vergrößerung der Abbildung 6-36 (erste Minute der Beobachtung)	167
Abbildung 6-38: Konvergenz der Position (X Y Z-Komponente) unter Verwendung von Galileo E1- Messungen.....	168
Abbildung 6-39: Ionosphärische Laufzeitverzögerungsschätzungen („ion“ in Meter) mit Standardabweichungs-Grenzwerten für einen zufällig gewählten Satelliten, Mehrdeutigkeits- Diskriminationstests-Ratios ("disc") und Mehrdeutigkeits-Erfolgsraten ("scr").....	169
Abbildung 6-40: Konvergenz der Position (X-, Y- und Z-Komponente) unter Verwendung von Galileo E5-Messungen.	169
Abbildung 6-41: Konvergenz der Position unter Verwendung von Galileo E5-Messungen; Vergrößerung der Abbildung 6-40 (die ersten 10 Minuten der Beobachtung).....	170
Abbildung 6-42: Ionosphärische Laufzeitverzögerungsschätzungen (E5) („ion“ in Meter) mit Standardabweichungs-Grenzwerten für einen zufällig gewählten Satelliten, Mehrdeutigkeits- Diskriminationstests-Ratios („disc“) und Mehrdeutigkeits-Erfolgsraten („scr“)	170
Abbildung 6-43: Zufällig gewählte Mehrdeutigkeitskombination (N1 = simulierte Galileo E5- AltBOC-Trägerphasenmehrdeutigkeit)	171
Abbildung 6-44: Konvergenz der Position unter Verwendung von Galileo E5-Messungen	172
Abbildung 6-45: Konvergenz der Position unter Verwendung von Galileo E1-, E5a- und E5- Messungen.....	172

Abbildung 6-46: Ionosphärische Laufzeitverzögerungsschätzungen (E1, E5a, E5) („ion“ in Meter) mit Standardabweichungs-Grenzwerten für einen zufällig gewählten Satelliten, Mehrdeutigkeit-Diskriminationstests-Ratio ("disc") und Mehrdeutigkeits-Erfolgsrate ("scr")	173
Abbildung 6-47: Zufällig gewählte Mehrdeutigkeitskombination „Float“-Schätzung in Rot, Grün und Blau und Fixierungsversuche der Mehrdeutigkeit in Dunkelgelb	173
Abbildung 6-48: Basislinie zur Bestimmung der Koordinaten einer Überwachungsstation.....	175
Abbildung 6-49: Ergebnisse des Positionsvergleichs nach 60 Tagen Überwachung;.....	176
Abbildung 6-50: Ergebnisse des Positionsvergleichs nach 120 Tagen Überwachung;.....	177
Abbildung 6-51: Feststellung der Bewegungsrate von ca. 21 cm durch Galileo E5-CPC-Messungen	178
Abbildung 6-52: Karte des Sendai-Erdbebens am 11. März 2011 und seiner Nachbeben bis 14. März 2011; die Größe und Farbe der Kreise sind von der Bebenstärke abhängig.....	179
Abbildung 6-53: Konfiguration des Prozessierungsnetzes.....	180
Abbildung 6-54: Vergleich der realen CPC-Lösungen von GPS L1 mit simulierten Daten.....	180
Abbildung 6-55: Vergleich der GPS L1-CPC-Ergebnisse vor und nach dem Erdbeben für die Station USUD	181
Abbildung 6-56: Vergleich der Galileo E5-CPC-Ergebnisse vor und nach dem Erdbeben für die Station USUD	181

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1-1: Frequenzen und Modulation der GALILEO-Signale.....	5
Tabelle 1-2: Frequenzen und Modulationen von COMPASS/BEIDOU in der 3. Phase	6
Tabelle 2-1: E5-Signal-Parameter	12
Tabelle 2-2: Codestreckenmessrauschen für GPS- und Galileo-Empfänger mit gleichen(45 dB-Hz) C/No und unterschiedlichen C/No.....	12
Tabelle 2-3: E5 Chiprate und Subträger-Rate	15
Tabelle 2-4: AltBOC-Subträger-Koeffizienten.....	16
Tabelle 2-5: Überblick über verschiedene Positionierungsmethoden	28
Tabelle 2-6: Ausgewählte Linearkombinationen von E5, E5a und E5b	61
Tabelle 3-1: Thermales Rauschen des Galileo E5 AltBOC-Signals	69
Tabelle 3-2: Genauigkeit und Verfügbarkeit der Orbitprodukte.....	85
Tabelle 3-3: Einfluss der Qualität der Galileo-Satellitenbahnen auf die zu bestimmenden Stationskoordinaten	86
Tabelle 3-4: Aufbau der Erdatmosphäre	87
Tabelle 3-5: Einfluss der troposphärischen Refraktion auf die gemessene Entfernung.....	89
Tabelle 4-1: Arten von GNSS-Referenznetzen.....	99
Tabelle 4-2: Gesamtschau der Eignung der Galileo E5-Einfrequenzpositionierung für verschiedene GNSS-Anwendungen:	101
Tabelle 4-3: Detaillierte Informationen über die Stationen des Haupttestnetzes	106
Tabelle 4-4: Detailinformationen über das BFCORS-Netz	107
Tabelle 5-1: Simulierte Signale.....	114
Tabelle 5-2: Typische Werte für GPS L1-Multipath-Fehler an verschiedenen EUREF-Stationen	119
Tabelle 5-3: Koordinatenunterschied der Ergebnisse aus Realdaten und simulierten Daten.....	126
Tabelle 5-4: Vergleich von a priori Koordinaten mit Simulationsergebnissen	126
Tabelle 6-1: Mit der Autokorrelations-Funktion (ACF) bestimmte Dekorrelationszeit	132
Tabelle 6-2: 3D RMS der CPC-Positionierungsergebnisse für drei verschiedene Regionen.....	136
Tabelle 6-3: Darstellung der statistischen Kerngrößen der Genauigkeitsanalyse für eine kurze Basislinie	148
Tabelle 6-4: Saisonale Variationen der Koordinaten-Komponenten über kurze Basislinien.....	149
Tabelle 6-5: Statistische Kenngrößen der Genauigkeitsanalyse für eine mittellange Basislinie	151
Tabelle 6-6: Saisonale Variationen der Koordinaten-Komponenten über mittellange Basislinien.....	151
Tabelle 6-7: Darstellung der statistischen Kenngrößen der Genauigkeitsanalyse für eine lange Basislinie	153
Tabelle 6-8: Saisonale Variationen der Koordinaten-Komponenten über lange Basislinien.....	154
Tabelle 6-9: Kurze Basislinien-Konfiguration des RCF-Filters mit der Annahme minimaler atmosphärischer Fehler.....	165
Tabelle 6-10: Konfiguration des RCF-Filters unter Annahme von signifikanten atmosphärischen Fehlern bei mittellangen Basislinien	167
Tabelle 7-1: Zusammenfassung der 3D-Positionsergebnisse; CPC: Code-plus-Carrier, CP: Carrier Phase Processing	183

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ADOP	Ambiguity Dilution of Precision
Adv	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen
AFREF	African Reference Frame
AltBOC	Alternate Binary Offset Carrier
ANSA	All-Inclusive Sequential Ambiguity Filter
ARP	Antennenreferenzpunkt
BFCORS	Burkina Faso CORS
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BOC	Binary Offset Carrier
BPS	Bits per second
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CBOC	Composite Binary Offset Carrier
CDDIS	Crustal Dynamics Information System
CDMA	Code Division Multiple Access
COMPASS/BeiDou	Chinesisches Satellitennavigationssystem
CORS	Continuously Operating Reference Stations
CPC	Code-Plus-Carrier
CS	Commercial Service
DLL	Delay Lock Loop
DoD	Departement of Defense
DoW	Day of Week
DoY	Day of Year
DS-SS	Direct Sequence Spread Spectrum
ECEF	Earth Centered Earth Fixed
EDAS	EGNOS Data Access Service
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
ESA	European Space Agency
ESTEC	European Space Research and Technology Centre
EU	European Union
EUREF	European Reference Frame
FKP	FlächenKorrekturParameter
FOC	Full Operational Capabilities
GAL OS SIS ICD	Galileo Open Service Signal In Space Interface Control Document
GCS	Ground Control Segment
GDAS	Global Data Assimilation System
GEO	Geostationäre Bahn
GFS	Global Forecasting Service
GIS	Geographic Information System
GLONASS	Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GNSS	Globale Satellitennavigationssysteme
GPPS	Geodätischer Postprocessing Positionierungsservice
GPS	Global Positioning System
GRAPHIC	Group And Phase Ionosphere Correction
GSTB	GALILEO System Test Bed
GTRF	GALILEO Terrestrial Reference Frame
IGS	International GPS Service

IGSO	Inclined GeoSynchronous Orbit
INS	Inertial Navigation System
IOC	Initial Operational Capabilities
IONEX	Ionosphere Map Exchange
IOV	In-Orbit Validation
IRIM	Ionospheric Residuals Integrity Monitoring
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LAMBDA	Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment
LEO	Low Orbit Satellite
LLI	Loss Lock of Indicator
MBOC	Multiplexed Binary Offset Carrier
MCS	Master Control Station
MEO	Medium Earth Orbit
MetO	Meteo Office (UK)
MGEX	Multi GNSS Experiment (IGS)
NCEP	National Centers for Environmental Predictions
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency (formerly National Imagery and Mapping Agency NIMA)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
NWM	Numerical Weather Model
OS	Open Service
PCV	Phase Center Variation
PLL	Phase Lock Loop
PRS	Public Regulated Service
RCF	Rapid Convergence Filter
RIMS	Ranging and Integrity Monitoring Station
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RTCM	Radio Transmission Committee for Marine Applications
RTK	Real Time Kinematic
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst
SGSS	Scientific GNSS Service Support
SINEX_TRO	Solution Independent Exchange Format for Combinations of Tropospheric Estimates
SIS	Signal-In-Space
SNR	Signal zu Rausch Verhältnis (Signal Noise Relation)
SoL	Safety of Life
SP3	Standard Product 3
SPD	Slant Path Delay
SWIPOS	Swiss Positioning
TEC	Total Electron Content
TECU	Total Electron Content Unit
TID	Travelling Ionospheric Disturbances
TROPEX	Tropospheric Exchange Format
UniBwM	Universität der Bundeswehr München
URE	User Range Error
UTC	Universal Time Coordinate
VTEC	Vertical Total Electron Content

WWW	World Wide Web
ZHD	Zenith Hydrostatic Delay
ZND	Zenith Neutral Delay
ZPD	Zenith Path Delay
ZRD	Zenith Residual Delay
ZTD	Zenit Total Delay
ZWD	Zenith Wet Delay

1 Einführung

1.1 Einleitung zum Thema präzise Positionierung mit Einfrequenz-Signal-Empfängern

Die wissenschaftliche Gemeinschaft hat die Vorteile der Positionierung mit dem US-amerikanischen Satellitennavigations-System GPS sehr früh erkannt und nutzt dieses und andere hinzugekommene Systeme (GLONASS, in der nahen Zukunft Galileo und COMPASS/BeiDou) seitdem für ihre Zwecke, vor allem für präzise Positionierungsanwendungen. Dabei herrscht bis heute das Paradigma vor, dass präzise Positionierung die Verwendung von Trägerphasenmessungen auf zwei oder mehreren Frequenzen voraussetzt.

In der Tat weisen Trägerphasenmessungen bei weitem geringeres Messrauschen auf und sind weniger anfällig für Mehrwegeeffekte als Codemessungen¹. Außerdem kann die ionosphärische Laufzeitverzögerung durch eine geeignete lineare Kombination von mindestens zwei Frequenzen eliminiert werden². Aus diesen Gründen werden bei annähernd allen wissenschaftlichen Applikationen ausschließlich Trägerphasenmessungen mit Zweifrequenz-Empfängern eingesetzt. Die meisten Hersteller von GNSS-Empfängern setzen ihren Entwicklungsschwerpunkt in der Folge weiter auf Mehrfrequenz-Empfänger, auch deshalb weil das Angebot an Signalen in Zukunft zunehmen wird: GPS wird verstärkt durch ein ziviles Signal auf dem L5-Frequenz-Band und die neuen Systeme wie Galileo senden mehrere Signale auf verschiedenen Frequenzbändern (E1, E5, E5a, E5b, E6).

Jedoch stellt der Kostenfaktor weiterhin eine große Hürde für den flächendeckenden Einsatz von Zweifrequenz-Empfängern dar. Geodätische Zweifrequenz-Empfänger sind derzeit mindestens dreimal so teuer wie Einfrequenz-Systeme. Auf dieser Basis wird angenommen, dass Mehrfrequenz-Empfänger (mit mehr als nur zwei Frequenzen) in ihren Kosten über denen von Zweifrequenz-Systemen liegen werden. Beispielsweise kommt es bei der Implementierung von internationalen und regionalen Referenzsystemen aufgrund der hohen Kosten für geeignete Zweifrequenz-Empfänger sehr oft nur zu einer spärlichen Anzahl von permanenten Beobachtungsstationen. Dies erklärt unter anderem die dünne Besiedlung mit Referenzstationen des ITRF³-Netzes in vielen Regionen der Erde, z. B. Afrika (siehe das IGS⁴-Netz). Daher ist es allein schon aus finanziellen Gründen eine Überlegung wert, wie die Genauigkeit von Einfrequenz-Systemen gesteigert werden kann, damit auch diese bei präzisen Positionierungsaufgaben eingesetzt werden können.

¹ Nach MISRA und ENGE [2001] variieren typische Multipath-Fehler bei Codestreckenmessungen zwischen 1 m bis zu mehr als 5 m in sehr reflektiven Umgebungen (z. B. sog. Urban Canyon). Bei Trägerphasenmessungen betragen dieselben Fehler lediglich noch 1-5 cm.

² Nach SEEBER [1989] kann der ionosphärische Effekt bei GPS durch Messung auf zwei Frequenzen weitestgehend erfasst werden. Dabei handelt es sich um die ionosphärische Laufzeitverzögerung 1. Ordnung. Die verbleibenden Fehler 2. und 3. Ordnung belaufen sich auf nur noch wenige cm.

³ ITRF: International Terrestrial Reference Frame

⁴ IGS: International GNSS Service, <http://www.igs.org/network/hourly.html>, letzter Aufruf 04.01.2013

Durch die GPS-Modernisierung und die Entwicklung von GALILEO werden nun neuartige Signale gesendet, die die Anforderungen einer präzisen Positionierung mit Einfrequenz-Empfängern erfüllen könnten. Galileo wird ein spezielles Signal senden, das vergleichsweise besser als alle anderen GNSS-Signale ist, nämlich das Breitband E5 AltBOC(15, 10) Signal. Dieses Signal (jedoch nicht seine Unterträger E5a und E5b) zeichnet sich durch niedriges Codemessrauschen nur im Zentimeter-Bereich aus sowie durch die niedrigste Mehrwegeeffekte-Auswirkung, die jemals in der Geschichte der Satellitennavigation beobachtet wurde.

Diese beträgt in einer günstigen Umgebung lediglich wenige Zentimeter. Auch der Multipath-Fehler ist bei weitem kleiner als bei allen anderen Signalen in sämtlichen anderen Umgebungen. Bis jetzt wurde das große Potenzial des E5-Signals für die präzise Positionierung nur wenig untersucht. Die Entwicklung eines hochwertigen E5-Einfrequenz-Empfängers bietet daher für die genaue Positionierung in der Zukunft vielversprechende Möglichkeiten. Dieses Potential wurde scheinbar von der wissenschaftlichen Gemeinschaft bislang noch nicht ausreichend erkannt, weswegen diese weiterhin auf herkömmliche Positionierungstechniken unter Nutzung von Mehrfrequenz-Empfängern setzt.

Voraussichtlich wird das derzeit in Entwicklung befindliche GNSS der Volksrepublik China „COMPASS/BeiDou“ ein Signal anbieten, das die gleichen Eigenschaften wie Galileo E5 vorweist. Diese Neuerung bedeutet, dass bei einer künftigen Interoperabilität von COMPASS/BeiDou und Galileo eine große Anzahl von Satelliten mit dem Breitband AltBOC Signal zur Verfügung steht, was wiederum eine Verbesserung der Genauigkeit zur Folge haben wird.

1.2 Entwicklungsstand von Galileo

Galileo ist ein gemeinsames Projekt der Europäischen Union (EU) und der Europäischen Weltraumorganisation ESA. Einige Staaten außerhalb der EU, wie z. B. China, Indien, Israel, die Schweiz, die Ukraine und Südkorea beteiligen sich ebenfalls am Aufbau von Galileo. Galileo ist mit dem US-amerikanischen GPS und dem russischen GLONASS interoperabel.

Zusätzlich werden derzeit Gespräche in puncto Gewährleistung der Interoperabilität mit dem chinesischen System COMPASS/BeiDou geführt. Nach der Fertigstellung des Systems wird Galileo aus 30 Satelliten in einer Walker Konstellation 27/3/1 (27 Aktive + 3 Ersatzsatelliten) bestehen, die in drei kreisförmigen „Medium Earth Orbit (MEO)“-Ebenen auf einer Höhe von 23.222 km über der Erde liegen und eine Bahnneigung von 56° mit Bezug auf die Äquatorialebene aufweisen (siehe Abbildung 1-1). Nach den Angaben der ESA ⁵ wird das System vom Boden zweier Hauptkontrollzentren (GCC: Galileo Control Center) in Europa und einem Netzwerk aus zwanzig Kontrollstationen (GCS: Galileo Sensor Stations) um den Globus gesteuert werden.

⁵ siehe ESA (European Space Agency), http://www.esa.int/esaNA/GGGMX650NDC_galileo_0.html, letzter Aufruf 28.12.2012

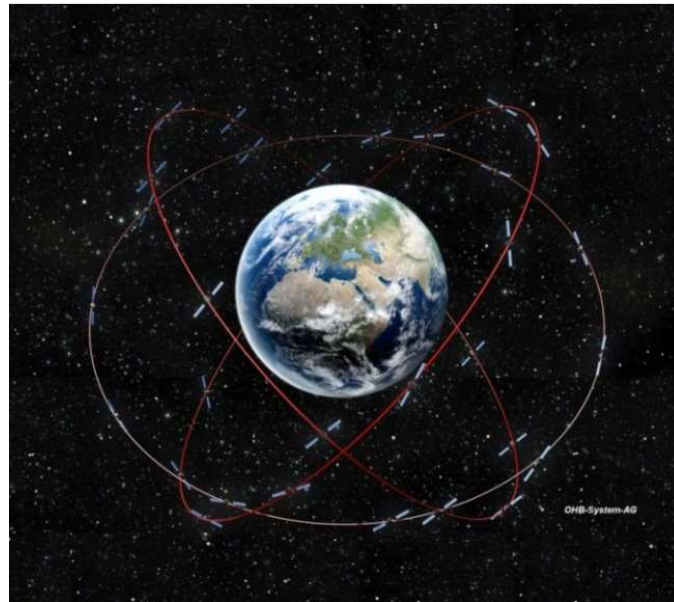


Abbildung 1-1: Galileo-Konstellation bestehend aus 30 Satelliten; Quelle: <http://www.sstl.co.uk/getattachment/0f9cec8b-1d2d-4c13-b97fa2d546ab6d4d/Galileo-constellation>

Die Entwicklung des Systems erstreckt sich auf verschiedene Phasen (siehe Abbildung 1-2): Ein erster experimenteller Satellit GIOVE-A wurde im Dezember 2005 gestartet. Die Mission dieses Satelliten war es, die Technologien von Galileo, vor allem dessen neue Signale, zu testen. Ein zweiter Satellit GIOVE-B wurde dann im April 2008 für zusätzliche Testzwecke (Test der neuen Wasserstoff-Maser Atomuhr) in Betrieb genommen. Die nächste Phase der Entwicklung des Systems wird als IOV- („In-Orbit-Validation“) Phase bezeichnet.

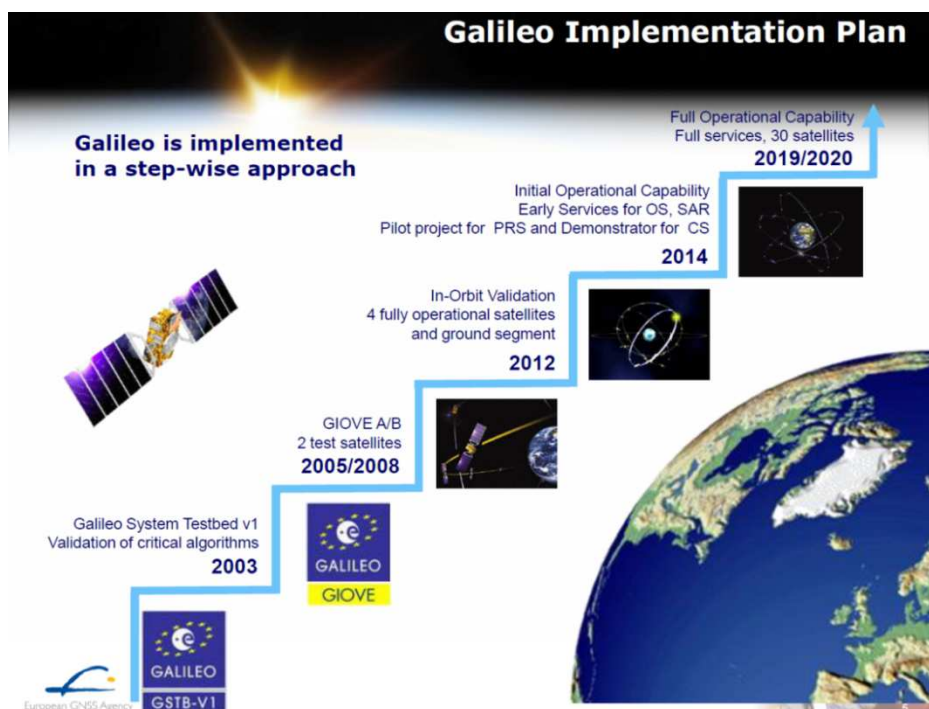


Abbildung 1-2: Galileo Implementierungsplan nach der European GNSS Agency, 2012

Während dieser Phase wird eine reduzierte Konstellation von vier Satelliten vorhanden sein. Die ersten beiden Satelliten wurden im Oktober 2011 von Europas Weltraumbahnhof Kourou mittels einer russischen SOJUS Rakete erfolgreich gestartet. Die restlichen IOV-Satelliten folgten im September des Jahres 2012 ins All. Nach Abschluss der IOV-Phase werden die restlichen Satelliten im Weltraum positioniert werden, um die volle Einsatzkapazität (FOC: „Full Operational Capability“) zu erreichen. Nach derzeitigem Stand ist die Fertigstellung des Systems zwischen 2018 und 2020 geplant. In der nahen Zukunft wird Galileo nur mit einer Konstellation von 18 Satelliten (4 IOV + 14 IOC: Initial Operational Capability) operieren.

Die Galileo-Navigationssignale werden über vier Frequenzbänder (in Blau auf Abbildung 1-3) übertragen (siehe GAL OS SIS ICD/D.0). Das Frequenzband L1 (E1) bei 1575,42 MHz und L5 (E5) bei 1176,45 MHz wird gemeinsam mit GPS genutzt. Das Band L2 bei 1227,6 MHz steht GPS allein zur Verfügung, für Galileo ist es das Band E6 bei 1278,75 MHz. Das Frequenzband L6 (in Orange auf Abbildung 1-3) wird für den SAR-Dienst verwendet.

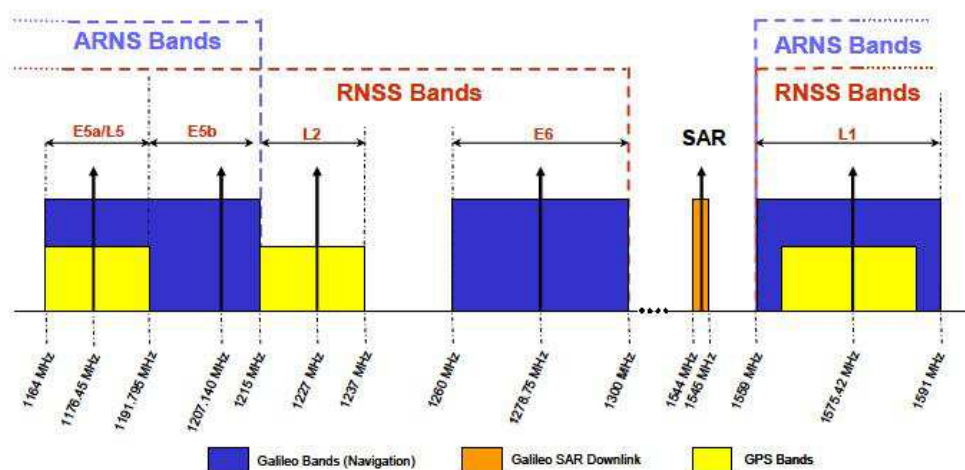


Abbildung 1-3: Schematische Darstellung der Signaldefinition von Galileo [GAL OS SIS ICD/D.0]

Galileo wird nach seiner Fertigstellung verschiedene Dienste anbieten, die den Navigations- und Positionierungsanforderungen der Nutzer weltweit abdecken können. Diese Dienste gliedern sich wie folgt:

- Der offene Dienst (OS: Open Service) resultiert aus der Kombination von offenen Signalen (E1, E5a, E5b, E5), die von Nutzern frei und kostenlos empfangbar sind. Die Positionsgenauigkeit des Dienstes liegt bei einigen Metern und die ständige Verfügbarkeit des Dienstes wird nicht garantiert.
- Der kommerzielle Dienst (CS: Commercial Service) ermöglicht den Zugang zu einem zusätzlichen Signal (E6), um mit einer hohen Datenrate von derzeit geplanten 1000 symbols/sec eine bessere Positionierungsgenauigkeit zu erreichen. Der Dienst ist kostenpflichtig und verschlüsselt.
- Der sichere Dienst (SoL: Safety of Life) ist eine Verbesserung des offenen Dienstes, indem rechtzeitige Warnungen im Falle von Genauigkeits-

einschränkungen oder Ausfall von Satelliten gegeben werden (Integritätsanforderung).

- Der regulierte oder staatliche Dienst (PRS: Public Regulated Service) ist ausschließlich hoheitlichen Kreisen wie Polizei, Küstenwache oder Geheimdienst, aber auch dem Militär vorbehalten. Er zeichnet sich durch eine hohe Kontinuität und einen eingeschränkten Zugang aus.
- Der Such- und Rettungsdienst (SAR: Search And Rescue) arbeitet mit COSPAS-SARSAT und MEOSAR⁶ zusammen und erlaubt eine schnelle und weltweite Ortung von Notsendern von Schiffen oder Flugzeugen. Eine Rückantwort von der Rettungsstelle an den Notrufsender und eine Rückverfolgung werden erstmalig ermöglicht.

Tabelle 1-1 fasst die Eigenschaften der Signale und die eingebundenen Dienste zusammen.

Signal	Frequenz [MHz]	Code Chiprate [Mcps]	Bandbreite [MHz]	Modulation	Service
<i>E1-A</i> (PRS)	1575,42	2,5575	24,552	BOCcos(15,2,5)	PRS
<i>E1-B</i> (<i>E1/LL,data</i>)	1575,42	1,023	24,552	CBOC(6,1,1/11)	OS,CS,SoL
<i>E1-C</i> (<i>E1/LL,pilot</i>)	1575,42	1,023	24,552	CBOC(6,1,1/11)	OS,CS,SoL
<i>E6</i>	1278,75	5,115	40,920	BPSK(5)	CS
<i>E6</i> (PRS)	1278,75	5,115	40,920	BOCcos(10,5)	PRS
<i>L6</i>	1544,0- 1544,2				SAR
<i>E5</i>	1191,795	10,23	51,150	AltBOC(15,10)	OS
<i>E5a</i>	1176,45	10,23	27,795	BPSK(10)	OS,CS
<i>E5b</i>	1176,45	10,23	23,205	BPSK(10)	OS,CS,SoL

Tabelle 1-1: Frequenzen und Modulation der GALILEO-Signale; OS: Open Service; SoL: Safety of Life; CS: Commercial Service; PRS: Public Regulated Service; Mcps: Megachips per second; [Trimble Poster, 2011]

1.3 Bedeutung von COMPASS/BEIDOU

Das COMPASS/BeiDou -System (auch als Beidou-2 bekannt) ist ein Projekt der Volksrepublik China mit der Zielsetzung, ein unabhängiges globales Satellitennavigations-System zu entwickeln. COMPASS/BeiDou ist nicht etwa eine Erweiterung des bisher eingesetzten Beidou-1, bei dem es sich um einen RDSS- (Radio Determination Satellite Service) Dienst handelte, sondern ein neues, mit GPS bzw. Galileo vergleichbares GNSS.

Die Entwicklung des Systems teilt sich in drei Phasen auf: Die erste Phase, Beidou-1, bestand aus drei GEO-Satelliten⁷ und erstreckte sich vom Jahr 2000 bis zum Jahr 2003. Während dieser Zeit standen nur RDSS-Dienste zur Disposition.

⁶ COSPAS-SARSAT und MEOSAR sind internationale, satellitengestützte Such- und Rettungssysteme zur Erfassung und Lokalisierung von Notfunkbaken.

⁷ Mehr Informationen zu den verschiedenen Phasen der Entwicklung von COMPASS/BeiDou finden sich auf der offiziellen Seite des Systems <http://www.beidou.gov.cn/>.

In der zweiten Phase während der Jahre 2003 bis 2012 wurde ein regionaler Satellitennavigationsdienst über China und angrenzende Regionen implementiert. Dieser Dienst wurde durch fünf geostationäre, fünf IGSO- und vier MEO-Satelliten bedient. In der dritten Phase wird eine globale Abdeckung durch den Navigationsdienst angestrebt und bis zum Jahr 2020 soll das System aus einer Walker-Konstellation von 24/3/2/1 (24 Aktive + 3 Ersatzsatelliten MEO), verteilt auf drei Bahnen, mit einer Inklination von 55°, fünf GEO- und drei IGSO-Satelliten bestehen⁸. COMPASS/BeiDou wird - wie die meisten GNSS - voraussichtlich zwei Dienste zur Verfügung stellen: Den offenen Dienst, der für alle nutzbar sein wird, und den autorisierten Dienst „Authorized“, für den nur autorisierte Nutzer Zugriffsrechte erhalten werden. Die Tabelle 1-2 zeigt einige Eigenschaften der Signale von COMPASS/BeiDou in der dritten Aufbauphase.

Signal	Frequenz [MHz]	Code Chiprate [Mcps]	Modulation	Service
<i>B1-C_D</i>	1575,42	1,023	MBOC(6,1,1/11)	Open
<i>B1-C_D</i>	1575,42	1,023	MBOC(6,1,1/11)	Open
<i>B1-A(Data)</i>	1575,42	2,046	BOC(14,2)	Authorized
<i>B1-A(Pilot)</i>	1575,42	2,046	BOC(14,2)	Authorized
<i>B2a_D</i>	1191,795	10,23	BOCcos(10,5)	Open
<i>B2a_P</i>	1191,795	10,23	AltBOC(15,10)	Open
<i>B2b_D</i>	1191,795	10,23	AltBOC(15,10)	Open
<i>B2b_P</i>	1191,795	10,23	AltBOC(15,10)	Open
<i>B3</i>	1268,52	10,23	QPSK(10)	Authorized
<i>B3-A_D</i>	1268,52	2,5575	BOC(15,2.5)	Authorized
<i>B3-A_P</i>	1268,52	2,5575	BOC(15,2.5)	Authorized

Tabelle 1-2: Frequenzen und Modulationen von COMPASS/BEIDOU in der 3. Phase; Chen GUCANG, China Satellite Navigation Office, [2011]

Nach Grelier et al. [2007] hat China bzgl. seines Frequenzplans den Weg gewählt, die Frequenzen weitgehend mit denen von Galileo zu überlappen, anstatt mit denen von GPS oder GLONASS, oder sogar das C-Band für die Übertragung seiner Dienste zu verwenden, das wiederum als Option für die Besetzung von Frequenzen der zweiten GNSS-Generation gilt. Die Überlappung betrifft mehrere Signale der beiden Systeme. In der Tat fallen zum einen das Galileo-E1- und das COMPASS-B1-Band zusammen, zum anderen werden Galileo-E5 und COMPASS-B2 die gleiche zentrale Frequenz haben. Somit werden die beiden Systeme in der Zukunft eine große Kompatibilität und Interoperabilität aufweisen. Dies wird sicherlich Vorteile in der Einfrequenz-Positionierung bei Nutzung der gleichartigen Signale E5 AltBOC (15,10) und B2 AltBOC (15,10) mit sich bringen.

⁸ GEO = Geostationäre Bahn (42.164 km über der Erde), IGSO=Inclined GeoSynchronous Orbit (42.164 km über der Erde), MEO Medium Earth Orbit (27.878 km über der Erde)

1.4 Lösungsansatz für präzise Einfrequenz-Positionierung mit E5

Die Entwicklungs- und Modernisierungsbestrebungen im GNSS-Bereich weisen zweifelsohne das Potential auf, die Positionierungsgenauigkeit erheblich zu erhöhen. Auch die Genauigkeit der Einfrequenz-Positionierung wird sicherlich hiervon profitieren. Diese Arbeit stellt einen Ansatz vor, der sich die Stärken des breitbandigen Galileo-E5-Signals zu Nutze macht, um eine präzise Positionierung mit Einfrequenz-Empfängern zu erzielen. Der Fokus liegt auf der Einfrequenz-Positionierung, da diese Empfängerart den Vorteil hat, dass bei Nutzung des E5-Signals das Genauigkeitspotenzial beinahe das Niveau von Zweifrequenz-Empfängern erreicht, der Preis nach Empfängerhersteller-Angaben (IFEN GmbH) jedoch etwas niedriger liegen wird.

Dieser Ansatz sieht primär vor, durch eine additive Kombination von Codestrecken- und Trägerphasenmessungen die ionosphärische Laufzeitverzögerung zu beseitigen. In dieser Arbeit wird diese Vorgehensweise als CPC („Code-Plus-Carrier“) bezeichnet. In der Tat verursacht die ionosphärische Laufzeitverzögerung den größten Fehleranteil bei GNSS-Messungen. Sie wird durch die additive Kombination von Strecken- und Trägerphasenmessungen eliminiert, da der Ionosphärenfehler bei beiden Messungen den gleichen Betrag ausmacht, jedoch unterschiedliche Vorzeichen aufweist. Bis jetzt war jedoch das hohe Coderauschen bei den GNSS-Signalen eine große Hürde für eine Verwendung dieser additiven Methode.

Die durch CPC gebildete Beobachtungsgröße hat ähnliche Eigenschaften wie die Trägerphasenmessung. Sie beinhaltet weiterhin den Mehrdeutigkeitsterm, der gelöst werden muss, um innerhalb einer kurzen Konvergenzzeit präzise Positionsergebnisse zu erreichen. Der Positionsvektor wird durch Bildung von doppelten Differenzen, die korrelierende Fehler eliminieren, berechnet (siehe Abbildung 1-4).

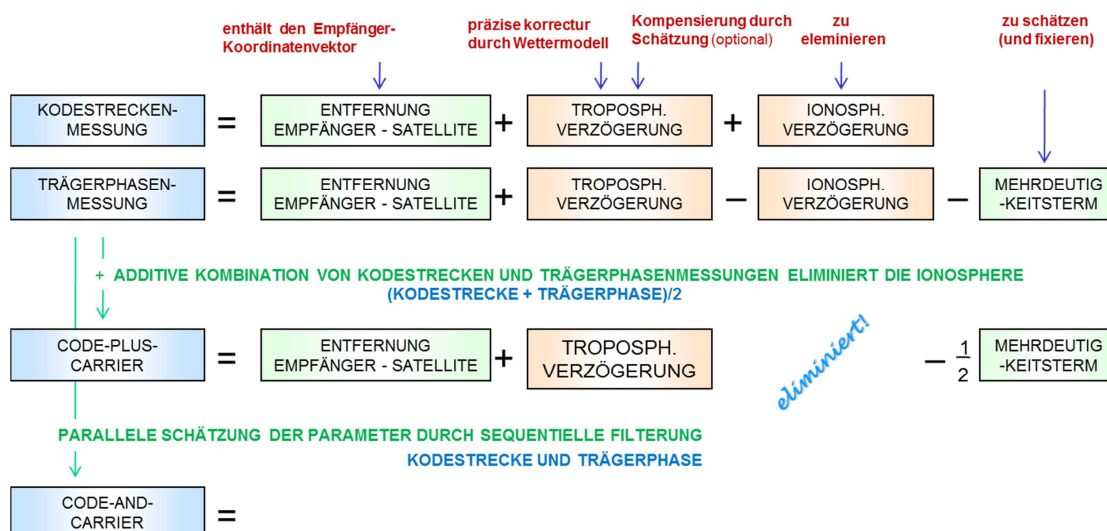


Abbildung 1-4: Lösungsansatz zur präzisen Einfrequenz-Positionierung

Der Einfluss der troposphärischen Laufzeitverzögerung kann meistens unter Einsatz von Standardmodellen kompensiert werden. In dieser Studie wird anhand zweier verschiedener Ansätze versucht, diese Problematik zu lösen. Erstens erlauben 3D-numerische Wetter-Modelle die troposphärische Laufzeitverzögerung zu integrieren und können genügend genaue Korrektionsparameter zurückliefern. Diese finden auch Anwendung bei kinematischen Applikationen (siehe SCHÜLER, [2001] und [2006]). Zweitens wurde das TropSite/TropGrid-Modell für Galileo entwickelt, das die Modellierung der gesamten Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung (die sog. ZPD: Zenit Path Delay) als Störparameter erlaubt. Diese Methode ist für statische und semi-statische Applikationen sehr gut geeignet.

Die Fixierung der Mehrdeutigkeiten bei Einfrequenz-Messungen bedarf der Nutzung rechenintensiver Algorithmen und kann sich daher sehr mühsam gestalten. Deswegen werden in einem ersten Schritt die Mehrdeutigkeiten als „Fließkomma“-Lösung mitgeschätzt. Dies führt jedoch erst nach einer gewissen Konvergenzzeit zum Erhalt präziser Koordinaten. In einem weiteren Schritt kann versucht werden, unter Einsatz verschiedener Algorithmen die Mehrdeutigkeit zu fixieren. Bei Galileo E5-Einfrequenz-Messungen dürfte dies aufgrund der Messgenauigkeit möglich sein. Die Konvergenzzeit wird dadurch wesentlich (ca. 20 min) reduziert. Da es viele GNSS-Anwendungen gibt, die in Echtzeit bzw. innerhalb von sehr kurzer Zeit präzise Positionen brauchen, stellt dies ein Problem dar.

Um diese Problematik zu lösen, beschäftigt sich diese Arbeit dann sekundär mit der Implementierung einer Filterungsmethode, die die Konvergenzzeit erheblich reduziert. Dieser Ansatz wird als RCF („Rapid Convergence Filter“-)Methode bezeichnet und basiert auf einer Kalman Filterung, die die Codestrecken- und Trägerphasenmessungen gleichzeitig (parallel) prozessiert. Damit werden die Positions-, die ionosphärischen, die troposphärischen und die Mehrdeutigkeitsparameter geschätzt und es werden über Basislinienlängen von ca. 10 km innerhalb von wenigen Minuten (< 5 min) präzise Koordinaten erzielt.

Die Einfrequenz-Positionierungsmethode kann die Koordinaten mit undifferenzierten Beobachtungsgrößen, d.h. im sog. PPP („Precise Point Positioning“-)Modus, berechnen. Jedoch erfordert die Vorgehensweise das Anbringen von Korrekturdaten, speziell von präzise Bahn- und Satellitenuhrkorrekturen, da die in den Satellitennachrichten gestellten Bahn- und Uhrinformationen nicht genau genug sind, um präzise Koordinaten zu erzielen. Außerdem kann die Problematik des „fractional phase Bias“⁹ ein großes Hemmnis darstellen. Als Alternative können durch die Bildung von doppelten Differenzen alle redundanten Fehler, vor allem die Uhrenfehler, und der „fractional Bias“ eliminiert werden. Somit wird der Integer-Charakter der Mehrdeutigkeiten bewahrt. Jedoch erfordert die Bildung der doppelten Differenzen die Nutzung der Daten einer Referenzstation. In dieser Arbeit wird der zweite Weg mit den doppelten Differenzen verfolgt, da diese die größte Genauigkeit versprechen.

⁹ Die Existenz von sog. „fractional phase Bias“ ist die größte Herausforderung bei der Lösung von Mehrdeutigkeit bei PPP-Anwendungen, siehe J.SHI und Y.GAO [2010].

1.5 Vorhandene wissenschaftliche Erkenntnisse im Bereich der präzisen Einfrequenz-Positionierung

Die Idee der additiven Kombination von Code- und Phasenmessungen für die Positionierung ist nicht neu: Die Methode wurde bereits vor langer Zeit erkannt, fand jedoch kaum Anwendung in der terrestrischen Positionierung. Bereits 1996 schlug z.B. YUNCK [1996] diese Methode unter der Bezeichnung GRAPHIC (Group and Phase Ionosphere Correction) für die Bahnbestimmung von GPS Satelliten vor. Sie wurde ausschließlich für Weltraummissionen angewendet, da die meisten GNSS Weltraum-Empfänger Einfrequenz-Empfänger sind.

Neuartige Satellitenmissionen setzen weiterhin hauptsächlich auf Einfrequenz-Empfänger wie von MONTENBRUCK et al. [2006] bezüglich der deutschen Satellitenmission TerraSAR-X beschrieben wird. Die Erklärung hierfür sind die exorbitant höheren Anschaffungskosten von weltraumgestützten GNSS-Mehrfrequenz-Empfängern (siehe PETOVELLO et al. [2009]). Bei der Überwachung von ionosphärischen Laufzeitverzögerungen wird die Kombination von Code- und Phasenmessungen ebenfalls genutzt. MORENO et al. [1999] sowie ISSLER et al. [2004] sahen den Hauptvorteil der Methode darin, dass keine Kalibrierung der Codestreckendaten notwendig ist, wobei die Zweifrequenz-Datenprozessierung die Bestimmung von Interfrequenzen-Codebiases benötigt. Außerdem haben MUELLERSCHOEN et al. [2004] die Nutzung der Code- und Phasenmessungen für die präzise Einfrequenz-Punktpositionierung (PPP) untersucht und herausgefunden, dass die Methode präziser ist als die Nutzung von Ionosphärenmodellen.

Schließlich haben SCHÜLER et al. [2010] den Einsatz eines GPS-Einfrequenz-Empfängers für die präzise Positionierung unter Verwendung der CPC-Kombination untersucht und fanden heraus, dass die sehr lange Konvergenzzeit und die geringe Genauigkeit (20-50 cm) limitierende Faktoren für die Verwendung des GPS L1 bei diesem Ansatz darstellen.

1.6 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Diese Studie setzt sich zum Ziel, eine alternative Methode zu den Mehrfrequenz-Positionierungs-Methoden vorzustellen. Um dieses Ziel zu verwirklichen, werden folgende Schritte unternommen:

Im Kapitel 2 werden als erstes die Eigenschaften des Galileo-E5-Signals dargestellt und die technischen Herausforderungen bei der Entwicklung eines Galileo-E5-Empfängers im Vergleich zu einem Schmalband-Empfänger (z.B. E1) thematisiert. Danach werden die Grundzüge der GNSS-Positionierung erläutert und dann speziell die Algorithmen der Einfrequenz-Positionierung mit Galileo-E5 detailliert vorgestellt. Dabei wird eine Abgrenzung zu herkömmlichen GNSS-Positionierungsverfahren vorgenommen. Das Kapitel behandelt die Implementierung der Prozessierungsalgorithmen für die Berechnung der präzisen Koordinaten und am Schluss die Problematik der Lösung der Mehrdeutigkeit.

In nachfolgenden Kapitel 3 wird primär auf theoretischer Ebene eine Fehleranalyse durchgeführt. Das Fehlerbudget wird möglichst vollständig und strukturiert dargestellt.

Neben wichtigen "primären" Einflussgrößen wie Rauschen der Codestrecke und Trägerphase sowie Mehrwege-Effekten wird die Genauigkeit von Reduktionsgrößen wie Erdzeiten und ozeanischen Auflasten behandelt. Schließlich sind bei dem hier gewählten Verfahren durch den Algorithmus bedingte Einflüsse von Bedeutung, insbesondere der Parameter-Konvergenzfehler, der durch die Hinzunahme der Mehrdeutigkeitsparameter auftritt. Diese werden als letztes behandelt.

Die Realisierung der präzisen Positionierung mit Galileo-E5-Einfrequenz-Empfängern eröffnet neue Potentiale für GNSS-Applikationen. In Kapitel 4 soll gezeigt werden, welche Anwendungsbereiche für diesen Positionierungsansatz in Frage kommen. Es wird erläutert, welche Genauigkeitsanforderungen die GNSS-Applikationen stellen und ob diese mit dem Einfrequenz-Ansatz erfüllt werden können. Danach werden verschiedene Testszenarien beschrieben, um die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Methode zu beurteilen.

Mit einer vollen Galileo-Satellitenkonstellation ist derzeit und in naher Zukunft nicht zu rechnen. Um die Leistungsfähigkeit des Einfrequenz-Positionierungsansatzes zu demonstrieren, ist es somit unabdingbar, mit simulierten Galileo-Daten zu arbeiten. Die Simulation muss die Realität so gut als möglich abbilden. Das Kapitel 5 wird den Vorgang der Datensimulation schrittweise erläutern und später durch realistische Experimente die Güte der Daten analysieren.

Schließlich werden in Kapitel 6 die gewonnenen Ergebnisse präsentiert und einer kritischen Bewertung und Interpretation unterzogen. Unter Betrachtung der ersten Aufbauphase von Galileo mit einer Konstellation von 18 Satelliten wird dann experimentell untersucht, welche Vorteile eine Multikonstellation aus Galileo und COMPASS/BeiDou bringen könnte. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse ab. Dabei wird auf Problembereiche hingewiesen und der Forschungsansatz insgesamt kritisch bewertet. Weiterhin wird ein Ausblick gegeben, welche Aspekte noch verbessert werden müssen bzw. welche Verbesserungen durch die zusätzliche Nutzung von COMPASS/BeiDou zu erwarten sind.

2 Algorithmen der präzisen Positionierung mit Galileo E5

Präzise Positionierung beschreibt das Verfahren, die Position eines Objekts mit einer Genauigkeit mindestens im Zentimeter-Bereich zu bestimmen. Diese Aufgabe wird sehr oft durch hochwertige geodätische GNSS-Empfänger erledigt, da die Massenmarkt-Empfänger lediglich Messungen mit einer Genauigkeit im Meter-Bereich durchführen können. Geodätische Empfänger nutzen mindestens Zweifrequenzen-Kombinationen für die Positionierung und sind daher nicht preiswert. Aus diesem Grund wird häufig nach kostengünstigeren Alternativen gesucht. In diesem Kapitel geht es darum, die Grundlagen des E5-Signal-Aufbaus zu erläutern und die Algorithmen, die zur präzisen Positionierung mit einem Galileo E5-Einfrequenz-Empfänger führen, vorzustellen.

2.1 Das E5 AltBOC (15,10)-Signal: der Schlüssel zur präzisen Einfrequenz-Positionierung

Das Galileo E5-Signal ist nach SCHIVARAMAIAH und DEMPSTER [2009] mit Abstand das anspruchsvollste aller in der Satellitennavigation verwendeten Signale. Das Galileo E5 verwendet eine spezielle Modulation, bekannt als Alternate Binary Offset Carrier (AltBOC). Insgesamt sind vier Codes (E5aI, E5Q, E5bI, E5bQ) auf die zwei Phasen der orthogonalen Unterträger aufmoduliert. Das Signal besitzt eine große Bandbreite von rund 51,15 MHz (die ersten zwei Hauptkeulen), siehe Abbildung 2-1. Die Bandbreite wird nominal auf bis zu 90 MHz geschätzt. Viele Empfänger-Hersteller beschränken sich aufgrund der technischen Herausforderungen aktuell auf das Minimum von 51,15 MHz Bandbreite. Darüber hinaus hat das EU-USA-Abkommen über den Galileo Frequenzen- und Signalplan eine Bandbreite von 92,02 MHz für Galileo E5 vorgesehen (siehe AVILA-RODRIGUEZ et al. [2004]). Das Galileo E5 ist ein direktes bandgespreiztes Signal (DS-SS: Direct Sequence Spread Spectrum) mit CDMA (Code Division Multiple Access).

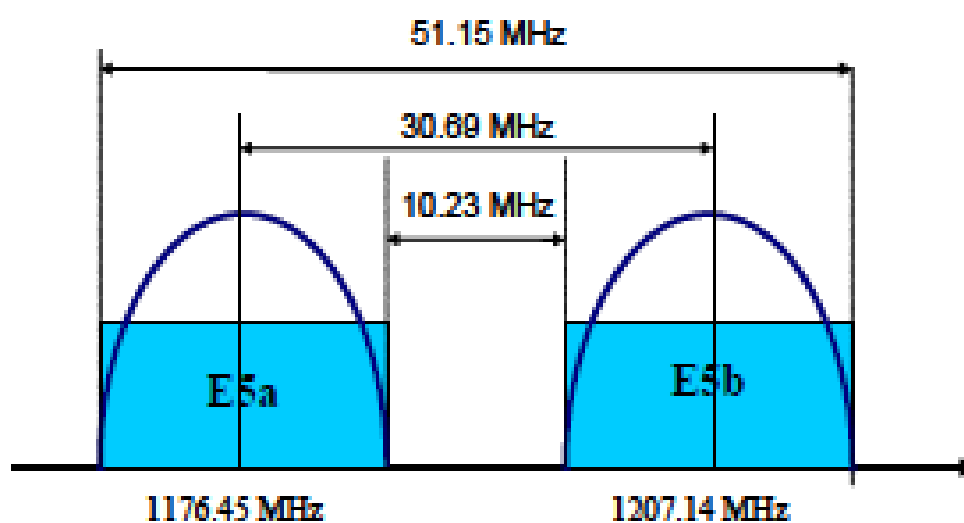


Abbildung 2-1: Darstellung des Spektrums von E5, LESTARQUIT et AL [ION GNSS 2008]

Die Tabelle 2-1 gibt eine Zusammenfassung der wichtigsten Parameter von E5:

Parameter	Wert
Trägerfrequenz f_c	1191,795 MHz
Codefrequenz f_{co}	10,23 MHz
Subträgerfrequenz	15,345 MHz
Codelänge	10230 chips
Modulation	AltBOC(15,10)
Untere Mittenfrequenz (f_a)	1176,45 MHz
Obere Mittenfrequenz (f_b)	1207,14 MHz
Bandbreite (E5)	51.15 MHz
Minimum empfangene Leistung	-155 dBW

Tabelle 2-1: E5-Signal-Parameter [GAL OS SIS ICD/D.0]

Das Potenzial des breitbandigen Signals E5 (und seiner Unterträger E5a und E5b) wurde im Vergleich zu anderen verfügbaren und künftigen GNSS-Signalen am Institut für Geodäsie und Navigation der Universität der Bundeswehr München untersucht. Die Hauptinnovation über den bisherigen Stand der Satellitennavigation hinaus ist die maßgebliche Verbesserung der Codestreckenmessung. Zwei Aspekte sind diesbezüglich relevant:

- **Das Codestreckenmessrauschen:** Es ist eine Funktion von mehreren Parametern, z.B. die Empfängerfilter-Bandbreite (die zurzeit bei GPS L1 bei 18 MHz liegt und nach dessen Modernisierung bei 24 MHz liegen wird) und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR:Signal-to-Noise Ratio, d.h. ein Satellit mit einer niedrigen Elevation weist wegen des langen Wegs durch die Atmosphäre mehr Rauschen auf).

Signal	Modulation	Leistung (dBW)	Bandbreite (MHz)	C/N ₀ (dBHz)		Coderauschen (m)	
GPS L1 C/A	BPSK(1)	-160	20.46	45	41.5	0.21	0.36
GPS L1 C/A	BPSK(1)	-160	20.46	45	41.5	0.41	0.61
GPS L5	BPSK(10)	-154	24	45	47.5	0.08	0.06
GALILEO E1	BOC(1,1)	-155	24	45	46.5	0.14	0.11
GALILEO E1	BOC(1,1)	-155	8	45	46.5	0.23	0.19
GALILEO E6	BPSK(5)	-155	40.92	45	46.5	0.11	0.09
GALILEO E5a oder E5b	BPSK(10)	-155	20.46	45	46.5	0.02	0.02
GALILEO E5	AltBOC(15,10)	-155	51.15	45	49.5	0.01	0.01

Tabelle 2-2: Codestreckenmessrauschen für GPS- und Galileo-Empfänger mit gleichen(45 dB-Hz) C/No und unterschiedlichen C/No, [EISSEFELLER et al., 2007]

Tabelle 2-2 fasst Werte für Codestreckenmessrauschen für verschiedene GPS- und Galileo-Signale zusammen und Abbildung 2-2 stellt einen Vergleich zwischen Galileo E1 (ähnlich GPS L1) und E5-Codestreckenmessrauschen, gemessen von den zwei experimentellen Galileo-Satelliten (GIOVE-A und GIOVE-B), dar.

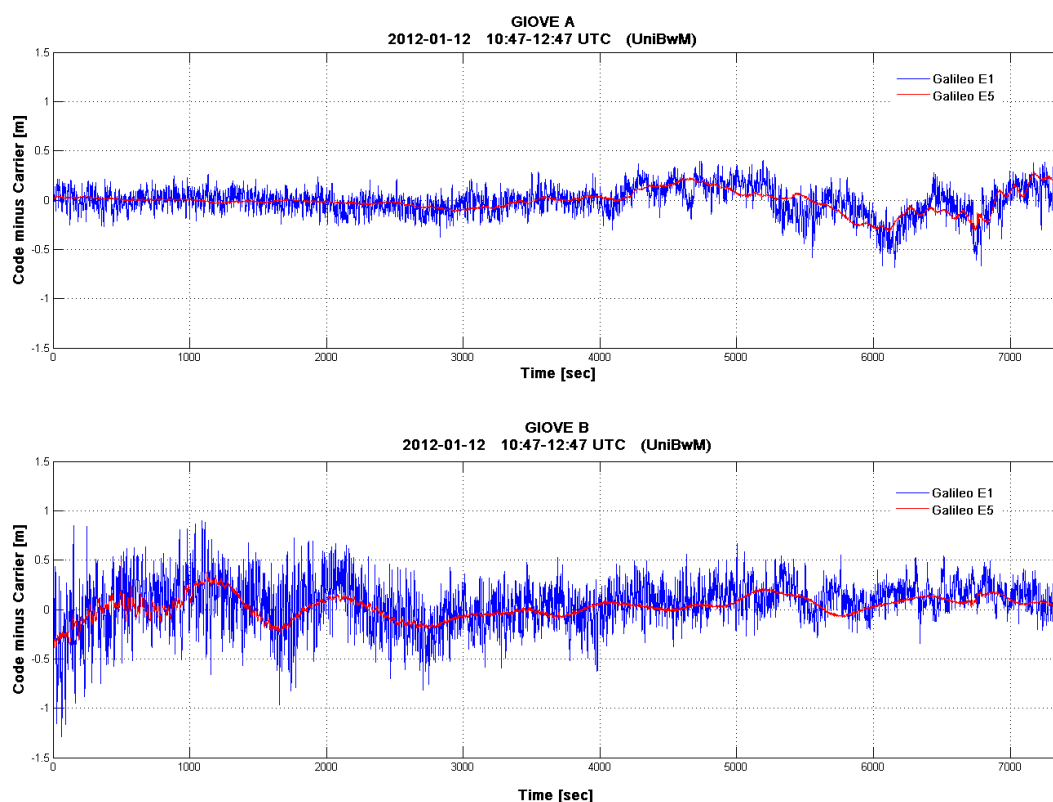


Abbildung 2-2: Streckenmessrauschen von ausgewählten Galileo-Signalen (E1 und E5)

Die beiden obigen Darstellungen zeigen, dass das Streckenmessrauschen bei allen Signalen im Submeter-Bereich liegt. Mit GPS-Empfängern wird ein Streckenmessrauschen im Bereich von 0,4 bis 0,9 m erreicht. Die neuartigen Signale von Galileo (E5a, E5b, E5) und das neue GPS L5-Signal weisen ein ultimatives Streckenmessrauschen im Bereich von nur wenigen Zentimetern auf. Das Trägerphasenmessrauschen ist noch niedriger und liegt bei heutigen modernen GNSS-Empfängern nur bei ca. 0,5 bis 0,9 mm. Damit stellt die Eigenschaft des geringeren Codestreckenmessrauschens eines der größten Potenziale von E5-Streckenmessungen für präzise Positionierungsaufgaben dar.

- **Die Mehrwegeeffekte:** Die Reflexion des Signals durch Objekte in der Nähe des Empfängers verursacht Mehrwege (Multipath)-Fehler. Normalerweise können alle hochwertigen Empfänger während der Korrelation mit diesem Fehler umgehen (Einsatz z.B. des „Narrow Correlator“ von NovAtel oder des „ $\Delta\Delta$ /High-Resolution Correlator“ von Ashtech, detailliert dargestellt bei IRSIGLER [2008]). Multipath wirkt wesentlich stärker bei Codestreckenmessungen (Fehlergrößenordnung bis zu einigen Metern) als bei

Trägerphasenmessungen (nur wenige Zentimeter). Dies ist einer der Gründe, warum Codestreckenmessungen bei den meisten wissenschaftlichen Anwendungen eine untergeordnete Rolle spielen.

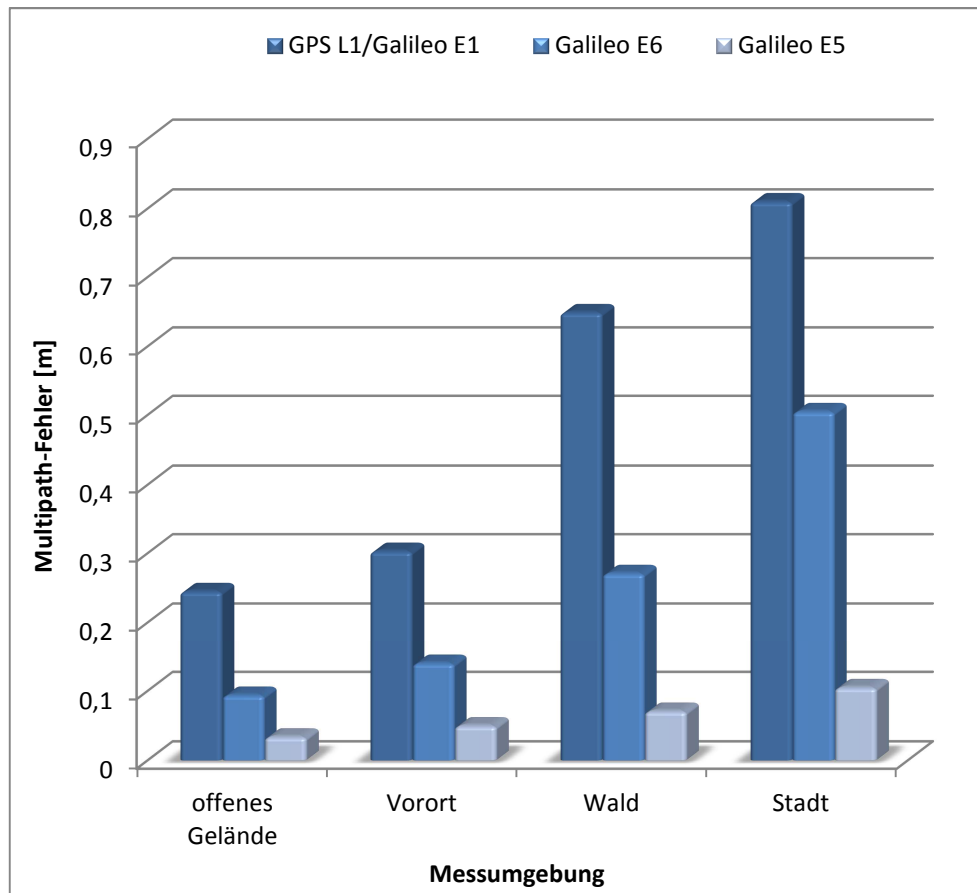


Abbildung 2-3: Codestrecken-Multipath-Fehler von verschiedenen Signalen; Annahme eines Empfängers mit „Narrow Correlator“ für Multipath-Mitigation;

Der Multipath-Effekt ist ein problematischer Fehler und die Abbildung 2-3 zeigt, dass dieser sich in verschiedenen Umgebungen unterschiedlich auswirken kann. GPS L1 (C/A Code) ist mit einem Maximalfehler von ca. 8 m am stärksten von diesem Effekt beeinflusst.

Im Gegenzug sind die Vorteile von E5 ersichtlich: Die Multipath-Leistung von E5 ist mindestens viermal so hoch wie die von GPS L1. Typische E5-Multipath-Fehler liegen im offenen Gelände bei 4 cm und können im städtischen Bereich bis zu 30 cm erreichen. Diese Leistungen übertreffen diejenigen aller zurzeit existierenden GNSS-Signale. Der Einfluss von Multipath auf E5 ist jedoch z.B. in städtischen Bereichen immer noch zu hoch für eine präzise wissenschaftliche Anwendung mit der Folge, dass er bei einer E5-Einfrequenz-Anwendung mitigiert werden muss.

2.1.1 Technische Herausforderung bei der Entwicklung eines Galileo E5-Empfängers

Derzeit wird der Schwerpunkt auf die Entwicklung von Mehrfrequenz-Empfängern und entsprechenden Positionierungstechniken gesetzt. Ein typisches Beispiel ist der Galileo E1/E5a Zweifrequenz-Empfänger, der vollständig kompatibel mit den künftigen GPS L1/L5-Signalen sein soll und daher attraktiver für den zivilen Markt. Unter anderem aus diesem Grund gibt es bis jetzt keinen nennenswerten, auf Galileo E5 basierenden Einfrequenz-Empfänger auf dem Markt. Ungeachtet dessen würde ein solcher Empfänger bei ungefähr gleichem Genauigkeitspotential nach Angaben eines Empfänger-Herstellers (IFEN GmbH) etwas preiswerter ausfallen.

Ein Galileo E5-Einfrequenz-Empfänger würde in mehrerlei Hinsicht von den Eigenschaften des breitbandigen AltBOC(15,10)-Signals profitieren. In der Tat sollte ein Galileo E5 Einfrequenz-Empfänger aufgrund des geringeren Codestreckenmessrauschens und der geringeren Mehrwegeeinflüsse in der Lage sein, genauere Messungen zu liefern, die die Anforderungen eines wissenschaftlichen GNSS-Empfängers erfüllen könnten. Nach SLEEWAEGEN et al. [2004] sind die angewandten Techniken zur Prozessierung der AltBOC-Modulation viel komplexer als diejenigen der traditionellen BPSK¹⁰- oder der üblichen BOC¹¹-Modulation. Dies resultiert aus der extrem großen Bandbreite und dem komplexen Zusammenspiel der vier Komponenten (E5a-I, E5a-Q, E5b-I, E5b-Q) des SpreizCodes. Die Codes und die Navigationsdaten werden, wie in Tabelle 2-3 ersichtlich, je nach Kanalcodierung mit folgenden Chip- und Symbol-Raten, angegeben:

Signal	Kanal	Code- chip- rate [Mchip/s]	Symbole rate [Symbole/s]
E5a	I (data)	10.230	50
	Q (Pilot)	10.230	-
E5b	I (data)	10.230	250
	Q (Pilot)	10.230	-

Tabelle 2-3: E5 Chiprate und Subträger-Rate, Quelle Galileo SIS ICD

In den folgenden Teilkapiteln wird auf die Strategien zur Bewältigung der technischen Herausforderungen bei der Entwicklung eines Einfrequenz-Galileo E5-Empfängers eingegangen.

¹⁰ BPSK: Binary Phase Shift Keying (2-PSK) ist ein Verfahren der Phasenumtastung bei digitalen Signalen. Dabei wird die Phase einer Sinusschwingung (Träger) durch Phasenverschiebung moduliert und zwischen zwei Phasenlagen umgeschaltet, siehe Galileo SIS ICD.

¹¹ Binary Offset Carrier (BOC) ist ein spezielles Kodierungsverfahren zur Frequenzspreizung beim sogenannten Codemultiplex, Galileo SIS ICD.

2.1.2 AltBOC Signal-Prozessierung

Die Gleichung des E5 AltBOC-Signals wird in dem Galileo SIS ICD-Dokument wie folgt angegeben:

$$S_{E5}(t) = \frac{1}{2\sqrt{2}} \begin{pmatrix} (e_{E5a-I}(t) + je_{E5a-Q}(t)) \cdot [sc_{E5-S}(t) - jsc_{E5-S}(t - T_{S,E5}/4)] + \\ (e_{E5b-I}(t) + je_{E5b-Q}(t)) \cdot [sc_{E5-S}(t) - jsc_{E5-S}(t - T_{S,E5}/4)] + \\ (\bar{e}_{E5a-I}(t) + j\bar{e}_{E5a-Q}(t)) \cdot [sc_{E5-P}(t) - jsc_{E5-P}(t - T_{S,E5}/4)] + \\ (\bar{e}_{E5b-I}(t) + j\bar{e}_{E5b-Q}(t)) \cdot [sc_{E5-P}(t) - jsc_{E5-P}(t - T_{S,E5}/4)] \end{pmatrix} \quad (2-1)$$

mit den binären Signalkomponenten e_{E5a-I} , e_{E5a-Q} , e_{E5b-I} , e_{E5b-Q} (Sie bestehen aus den BPSK-modulierten Codes und deren jeweiligem Navigationsdatenstrom für jeden Kanal). Die jeweiligen gestrichelten Signalanteile \bar{e}_{E5a-I} , \bar{e}_{E5a-Q} , \bar{e}_{E5b-I} , \bar{e}_{E5b-Q} repräsentieren Produkt-Signale:

$$\begin{aligned} \bar{e}_{E5a-I} &= e_{E5a-Q} \cdot e_{E5b-I} \cdot e_{E5b-Q}, \\ \bar{e}_{E5a-Q} &= e_{E5a-I} \cdot e_{E5b-I} \cdot e_{E5b-Q}, \\ \bar{e}_{E5b-I} &= e_{E5b-Q} \cdot e_{E5a-I} \cdot e_{E5a-Q}, \\ \bar{e}_{E5b-Q} &= e_{E5b-I} \cdot e_{E5a-I} \cdot e_{E5a-Q}, \end{aligned} \quad (2-2)$$

Die Parameter sc_{E5-S} und sc_{E5-P} stellen die vier Sub-Träger-Funktionen für die einzelnen Signale und das Signalprodukt dar:

$$sc_{E5-S}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} AS_{|i|_8} \cdot \text{rect}_{T_{S,E5}/8}(t - i \cdot T_{S,E5}/8) \quad (2-3)$$

und

$$sc_{E5-P}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} AP_{|i|_8} \cdot \text{rect}_{T_{S,E5}/8}(t - i \cdot T_{S,E5}/8)$$

mit den Koeffizienten AS_i und AP_i gemäß der Tabelle 2-4:

i	0	1	2	3	4	5	6	7
$2 \cdot AS_i$	$\sqrt{2} + 1$	1	-1	$-\sqrt{2} + 1$	$-\sqrt{2} + 1$	-1	1	$\sqrt{2} + 1$
$2 \cdot AP_i$	$-\sqrt{2} + 1$	1	-1	$\sqrt{2} + 1$	$\sqrt{2} + 1$	-1	1	$-\sqrt{2} + 1$

Tabelle 2-4: AltBOC-Subträger-Koeffizienten, Quelle: Galileo SIS ICD

Grundsätzlich können zwei verschiedene Ansätze für die Prozessierung des AltBOC-Signals verfolgt werden:

- Die gesamte Bandbreite kann empfangen und damit eine direkte Demodulation durchgeführt werden. Dies wird „Single Band“-Methode genannt.
- Die untere Bandbreite E5a und die obere Bandbreite E5b werden getrennt akquiriert und demoduliert und anschließend zusammengeführt. Dies wird als „Split Band“-Methode bezeichnet.

Für den weiteren Verlauf werden die Subträger im Fall einer „Single Band“ AltBOC-Prozessierung als reine binäre Funktion und im Fall einer „Split Band“-Prozessierung als reale Cosinus-Funktion betrachtet. Somit ergibt das Signal:

$$s_{E5}(t) = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \left(\begin{aligned} &(e_{E5a-I}(t) + e_{E5b-I}(t)) \cdot sc_{\cos} + j(e_{E5b-I}(t) - e_{E5a-I}(t)) \cdot sc_{\sin} + \\ &(e_{E5a-Q}(t) - e_{E5b-Q}(t)) \cdot sc_{\sin} + j(e_{E5a-Q}(t) + e_{E5b-Q}(t)) \cdot sc_{\cos} \end{aligned} \right) \quad (2-4)$$

mit

$$sc_{\sin}(t) = sc_{E5-S}(t)$$

$$sc_{\cos}(t) = sc_{E5-S}(t - T_{s,E5} / 4)$$

2.1.3 AltBOC-Prozessierung durch ein Breitband-Frontend („Single Band“-Prozessierung)

Dieser Ansatz zur Implementierung eines AltBOC-Einfrequenz-Empfängers basiert auf der FPGA¹² (Field Programmable Gate Array)-Technologie. Die folgende Beschreibung folgt der Anleitung zum Aufbau eines Breitband-Empfängers der Firma IFEN GmbH. Die Abbildung 2-4 veranschaulicht einen möglichen Breitband-Prozessierungsablauf.

Der Ansatz akquiriert und verfolgt die gesamte Bandbreite des E5-Signals. Nach der Gleichung (2-4) kann entweder die Summe oder die Differenz der primären Codes der Pilotkanäle (diese sind jeweils mit Cosinus- und binären Sinus-Funktionen auf den Unterträgern aufmoduliert) als lokale Replik für die Verfolgung des AltBOC-Signals verwendet werden. Jedoch führt dies zu mehrstufigen Codes mit folgenden Werten [-2, 0, 2]. Zum anderen, aufgrund der unterschiedlichen sekundären Codes auf E5a-Q und E5b-Q, wird die komplette 100 ms-Codesequenz in der Hardware zur Verfügung stehen müssen und während der Akquisition durchsucht werden müssen. Daher erscheint es besser, die Sequenz entweder mit beiden Unterträgern zu korrelieren oder gegen jeden einzelnen Piloten-Code zu korrelieren, der jeweils wieder mit Sinus- und Cosinus-Funktionen moduliert ist.

Die Entscheidung, welche Werte zu berücksichtigen sind oder welche Operationen mittels der integrierten Werte auszuführen sind, kann dann später durch eine Basisband-Prozessierung getroffen werden. In jedem Fall sind vier Korrelatoren nötig, um eine Operation für einen der insgesamt drei Verfolgungskanäle durchzuführen.

¹² FPGA: Ein Field Programmable Gate Array (kurz: FPGA) ist ein Integrierter Schaltkreis (IC) der Digitaltechnik, in den eine logische Schaltung programmiert werden kann.

Dies führt zu zwölf Korrelatoren für das „Early-Prompt-Late“¹³, mit denen die gesamte Bandbreite (ca 70 MHz) erfasst werden kann. Es wird eine Technik implementiert, die es erlaubt, zwei benachbarte Kanäle kohärent zu koppeln und damit die Anzahl der Korrelatoren zu verdoppeln. Der daraus resultierende Kanal hat somit die gleiche Komplexität wie zwei Kanäle, die benötigt werden, um die beiden Unterträger-Signale auf E5a und E5b zu verfolgen. Im Sinne einer Optimierung des Ansatzes könnte diese Komplexität gemindert werden, indem ein Register für die sekundären Codes zum Kanal hinzugefügt wird, um vor der Korrelation eine (korrekte) lineare Kombination zu bilden. Nun wird das Signal nur mit den Cosinus-Komponenten akquiriert. Die Verfolgung (Tracking) auf dieser Signal-Komponente ist stabil genug, um Bit-Synchronisationen auf dem sekundären Code zu erreichen.

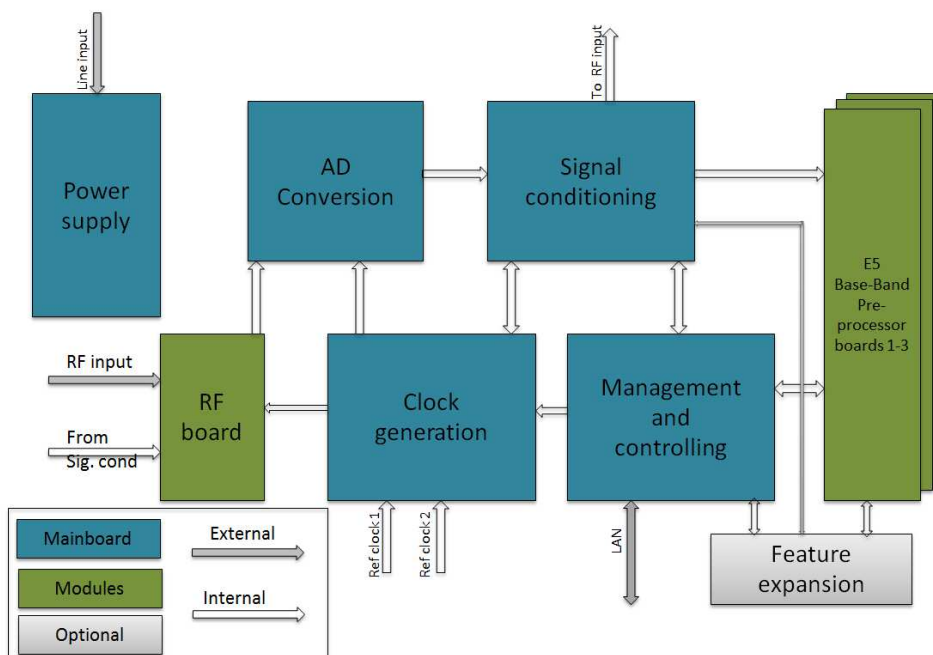


Abbildung 2-4: Breitband-Frontend-Signal-Prozessierung von Galileo E5 AltBOC, Quelle IFEN GmbH, patentiert von der IFEN GmbH

Sobald die Bit-Synchronisation erreicht ist, wird die kohärente Kombination aller Signalkomponenten in einem virtuellen Korrelator ausgearbeitet, der für das Code- und Phase-Diskriminierungsverfahren verwendet wird. Für das Code-Tracking wird das Skalarprodukt mit einem Diskriminator gebildet und zusammen mit einem Hüllendetektor genutzt, um falsche Bit-Locks zu vermeiden. Als Standardkonfiguration wird sehr oft ein Korrelatorabstand von $d = 0,2$ Chips (gemessen in Einheiten der BPSK (10)-Chip-Länge) oder 19,55 ns verwendet.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Prozessierung der gesamten Bandbreite des Galileo E5-Signals sehr komplex ist und leistungsfähige und damit kostspielige Hardware erfordert.

¹³ Early-Prompt-Late: WARD et al. [2006] erklären noch detaillierter das Prinzip der Satellitensignal-Akquisition, Tracking und Datendemodulation.

Die Anwendung der Methode der „Single Band“-Prozessierung würde daher die Kosten eines Galileo E5-Einfrequenz-Empfängers im Vergleich zu einem Mehrfrequenz-Empfänger auf einem annähernd gleichen Niveau halten.

2.1.4 AltBOC-Prozessierung durch ein duales Frontend

Die hier beschriebene „Split-Band“ AltBOC-Prozessierungsmethode wurde ebenfalls von der Firma IFEN GmbH entworfen und basiert auf einem Software (S/W)-Empfänger (siehe Abbildung 2-5).

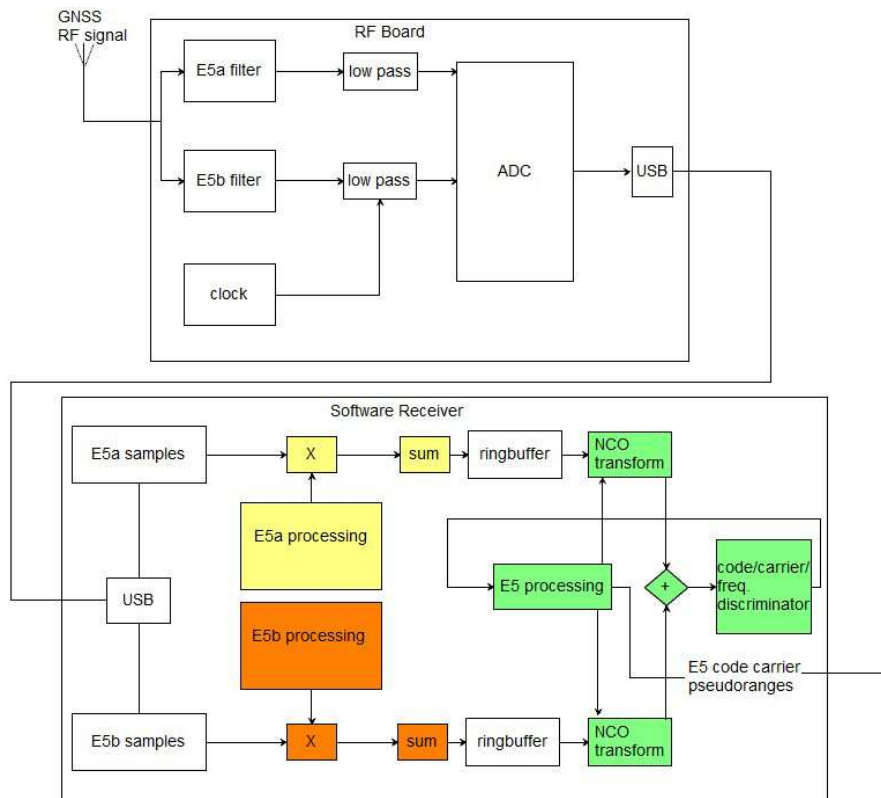


Abbildung 2-5: AltBOC-Prozessierung mit einem S/W-Empfänger (gleichfarbige Elemente laufen innerhalb desselben Prozesses); Quelle IFEN GmbH, patentiert von der IFEN GmbH

Im Inneren des Frontend werden die E5a- und E5b-Signale über zwei getrennte Radio-Frequenzen (RF)-Ketten verarbeitet, was die wesentliche Innovation des Empfängers darstellt. Hierdurch wird ermöglicht, dass die vier RF-Kanäle (E5a-I, E5a-Q, E5b-I, E5b-Q) dasselbe RF-Kanal-Design teilen und der Empfänger eine maximale Abtastrate von 40,96 MSample/s pro RF-Kanal unterstützt. Die E5a- und E5b-Signal-Samples werden synchron im gleichen „Analog-Digital-Converter“ (ADC)-Chip generiert und über den USB-Bus auf einen Computer übertragen, auf dem der Software-Empfänger läuft. Der S/W-Empfänger erfasst und trackt das Signal aus Leistungsgründen separat auf den Frequenzen E5a und E5b. Die Prozesse werden mit einer festen Rate von ca. 21 ms miteinander synchronisiert. Zwischen den Synchronisationspunkten laufen die Prozesse (und damit die E5a/b-Tracking-Kanäle) unabhängig voneinander. Die integrierte Rate bezieht sich auf die gewählte kohärente Integrationszeit. Hier bietet ein Wert von 20 ms einen guten Kompromiss zwischen Quadraturenverlust und Frequenz/Phasen-Tracking-Stabilität.

Da es sehr effizient ist, die Frequenzen E5a und E5b in separaten Prozessen (und auf separaten CPU-Kernen) auszuführen, wird die Kombination von E5a- und E5b-Korrelationswerten zu E5-Korrelationswerten bei der Post-Korrelationsebene durchgeführt. Es gibt keine Rückkopplung des E5-Kanals zu den E5a/b-Kanälen. Die E5a/b-Korrelationswerte werden in Ringpuffern zusammen mit den E5a/b-Oszillatoren (NCO: Numerical Controllable Oscillator)-Werten gespeichert, die bei der Korrelation genutzt wurden. Sobald die E5a- und E5b-Signale eines bestimmten Senders (Satellit) getrackt sind, wird ein E5-Kanal gestartet. Dieser Kanal hat keine eigenen Korrelatoren, aber er ruft E5a- und E5b-Korrelationswerte aus dem Ringpuffer. Der E5-Kanal verfügt jedoch über eigene NCO. Eine spezielle Transformation wird genutzt, um die NCO-Unterschiede zwischen den E5a/b-NCO-Werten und den E5-NCO-Werten festzustellen. Die transformierten Korrelationswerte werden zusammengefügt und verwendet, um die Diskriminatoren-Werte zu berechnen. Anhand der E5-NCO-Werte werden die Code- und Trägerphasen-Pseudostrecken, der Dopplerwert und die Signal-zu-Rausch-Verhältnis-Werte (C/N0), welche die primären Ausgaben des Empfängers sind, berechnet. Obwohl der E5-Empfänger ein virtueller Empfänger ist (d.h. ohne Korrelatoren), hat er die gleiche Benutzeroberfläche mit den meisten Konfigurationsparametern wie herkömmliche Empfänger. Der S/W-Ansatz betrachtet zurzeit nur die Pilot-Komponenten der Signale. Die Einbeziehung der Datenkomponenten ist für die Prozessierung des Signals nicht erforderlich, da die Datenkomponenten während der kurzen Integrationszeit (4 ms) zu hohen C/N0-Werten beitragen und zu einem erheblichen Quadraturenverlust führen können.

Die Implementierung eines Galileo E5-Einfrequenz-Empfängers muss unter Berücksichtigung aller für die präzise Positionierung relevanter Anforderungen durchgeführt werden. Insbesondere müssen alle Fehler-Biases, Rauschen und interne Empfänger-Multipath-Effekte aus den Messungen beseitigt werden können. Um die gewünschte Flexibilität und Konfigurierbarkeit zu erreichen, ist ein Software-Empfänger eine adäquate technische Lösung, um die Kosten des Empfängers auf einem moderaten Niveau zu halten.

2.1.5 Die Herausforderung der AltBOC-Prozessierung

Nach SLEEWAEGEN et al. [2004] ist die Prozessierung des breitbandigen AltBOC-Signals für den Empfänger aus zwei Gründen eine Herausforderung:

- Die Prozessierung des AltBOC-Signals erfordert, dass das gesamte E5-Band durch dieselbe RF / IF¹⁴-Kette herunterkonvertiert wird. Die minimale Signal-Bandbreite beträgt 50 MHz (d.h. sie enthält nur die Hauptkeule). Dies führt zu bei weitem höheren Abstraten und Uhrenfrequenzen als dies bei heutigen GNSS-Signalen der Fall ist.
- Die „Single Band“-Prozessierung gestaltet sich, wie im Abschnitt 2.1.3 ausführlich dargestellt wurde, aufgrund der komplexen Natur des AltBOC-Signals als schwierig,

¹⁴ RF=Radio Frequency, IF= Intermediate Frequency: Vertiefende Literatur zum Thema GNSS-Signal-Prozessierung findet sich bei SPILKER UND PARKINSON [1996].

Darüber hinaus sind bei einem Vergleich des Breitband-Einfrequenz-Empfängers mit herkömmlichen Einfrequenz-Empfängern zwei Aspekte zu beachten: die Analog/Digital (A/D)-Konvertierung und die digitale Prozessierung. Beide müssen bei viel höheren Abtastraten im Vergleich zu einem L1-Einfrequenz-Empfänger vorgenommen werden. So ist die Taktrate eines solchen Empfängers deutlich höher (um den Faktor 10 bis 20), jedoch ohne diejenige eines Zweifrequenz-Empfängers zu erreichen. Zudem ist die gesamte Signal-Bandbreite des E5-Einfrequenz-Empfängers im Vergleich zu einem Zweifrequenz-Empfänger (z.B. L1 + L2) etwa um den Faktor 4 höher (22 MHz zu 90 MHz) und das Signal wird nicht auf zwei Frequenz-Pfaden verarbeitet. Zusammenfassend kann die Komplexität der AltBOC-Prozessierung beinahe entsprechend derjenigen eines Zweifrequenz-Empfängers angenommen werden, da die Kanal-Struktur des AltBOC-Trackings komplexer ist als z.B. die des GPS L1-Signals. Für Zweifrequenz-Empfänger werden zwei Kanäle für die Verfolgung der zwei Signale verwendet und bei Einfrequenz-Empfängern entspricht die Komplexität eines AltBOC-Kanals etwa derjenigen von zwei einzelnen Kanälen. In Kapitel 3 werden einige charakteristische Fehlereinflüsse auf die E5-Einfrequenz-Prozessierung erläutert.

2.2 Allgemeines zur GNSS-Positionierung

Das Grundprinzip der GNSS-Positionierung beruht auf dem Prinzip der Einweg-Entfernungsbestimmung. Dabei bestimmt der GNSS-Empfänger für jeden Satelliten die Zeitverschiebung zwischen dem Senden des Signals und dem Signalempfang. Diese Zeitdifferenz wird dann mit der Laufgeschwindigkeit des Signals multipliziert. Somit wird die Entfernung zwischen Satelliten und Empfänger ermittelt. Im Wesentlichen gibt es zwei Beobachtungsgrößen¹⁵, die für die Positionsberechnung wichtig sind: Die Codestrecken- und die Trägerphasenmessung.

2.2.1 Die Beobachtungsgrößen

Die Codestreckenmessung nutzt PseudozufallsCodes, um eine Strecke zu generieren¹⁶. Die Code-Pseudostrecke PR_i^k (Gleichung 2-5) ist der geometrische Abstand zwischen dem Empfänger i und dem Satelliten k , basierend auf der Messung der Codephase (sog. „Memory Codes“¹⁷ bei Galileo E5) und ist durch Fehler aus der Atmosphäre (Ionosphären- & Troposphärenfehler), Satellitenorbit- und Uhrfehler sowie lokalen Effekte wie Mehrwege verfälscht. Die ermittelten Strecken werden „Pseudostrecken“ (engl. „Pseudo Ranges“) genannt, weil damit die systematische Verfälschung dieser Messungen um den Uhrfehler des Empfängers angedeutet wird (siehe SCHÜLER [2006]). Die Gleichung der Codestreckenmessung kann folgendermaßen ausgedrückt werden:

¹⁵ Die Dopplermessung ist ebenfalls eine Beobachtungsgröße. Sie dient im Wesentlichen der Geschwindigkeitsbestimmung und einzelnen Vorverarbeitungsprozessen, wie beispielsweise der Codeglättung, und wird daher nicht weiter behandelt.

¹⁶ Für vertiefende Informationen siehe MISRA und ENGE [2001].

¹⁷ „Memory codes“ sind zufällige und optimierte Codes wie die „Gold codes“ of GPS L1, siehe Galileo SIS ICD.

$$PR_i^k = \rho_i^k + c \cdot (\delta_i - \delta_i^k) + \delta I_i^k + \delta I_{pi}^k + \varepsilon_{pi}^k \quad (2-5)$$

ρ_i^k : Geometrische Strecke von Empfänger i zum Satelliten k

δ_i : Empfängeruhrfehler

δ_i^k : Satellitenuhrfehler

δI_i^k : Ionosphärische Laufverzögerung

δI_{pi}^k : Troposphärische Laufverzögerung

ε_{pi}^k : Messrauschen (Multipath- und andere Hardware-Verzögerungen)

Die Codestreckenmessung ist sehr rauschanfällig und stark von Mehrwegeeffekten beeinflusst. Galileo E5-Codestreckenmessungen weisen jedoch weniger Codemessrauschen und Mehrwegeeffekte als andere GNSS-Signale auf (siehe Abschnitt 2.1). Die Codestreckenmessung ist eine robuste Messgröße, die auch unter schlechten Signalbedingungen verfügbar ist, ihre Genauigkeit ist jedoch begrenzt (1-10 m und 5-20 m bei schlechten Signalverhältnissen). Der Grund ist die Länge von 29.325 m eines Chips des Galileo „Memory Codes“.

Bei der Trägerphasenmessung wird die Beobachtungsgröße durch die Differenz zwischen der vom Satelliten ausgesendeten Trägerphase und der Phase des Referenzsignals generiert¹⁸. Die Trägerphasenmessung ist deutlich genauer (mm- bis cm-Bereich), da die Wellenlänge z.B. des Galileo E5-Trägers nur 25 cm (1191.795 MHz) ist und damit die Messung der Phase des Trägers auf einige cm bis mm genau ist. Die Trägerphasenmessung lässt sich in metrischer Form durch die Multiplikation mit der Wellenlänge λ wie folgt darstellen:

$$\Phi_i^k = \rho_i^k + c \cdot (\delta_i - \delta_i^k) + \lambda \cdot N_i^k - \delta I_i^k + \delta I_{\Phi_i}^k + \varepsilon_{\Phi_i}^k \quad (2-6)$$

N_i^k : Mehrdeutigkeit der Phasenmessung

λ : Wellenlänge der Trägerfrequenz

$\varepsilon_{\Phi_i}^k$: Messrauschen der Phasenmessung (Multipath- und andere Hardware-Verzögerungen)

Neben der Messung der Phase muss hier aber auch noch die Anzahl der Wellen (ganzzahlige Anzahl von Zyklen N_i^k) zwischen Satellit und Empfänger bestimmt werden (Auflösung der Trägerphasenmehrdeutigkeit – „Ambiguity Resolution“). Sind die Mehrdeutigkeiten einmal korrekt aufgelöst worden, kann der Empfänger auf wenige cm bis mm genau positionieren. Um die „gelöste“ Mehrdeutigkeit nicht zu verlieren, muss die Trägerphase kontinuierlich verfolgt („getrackt“) werden.

¹⁸ siehe SEEBER [1989]

Wegen der geringen Länge von ca. 25 cm des Trägersignals bei Galileo E5 ist deswegen die kontinuierliche Nachführung sehr schwierig und nur unter guten Signalbedingungen möglich. Daher ist die Verfügbarkeit der Messung der Trägerphase sehr viel fragiler als die der Codephase.

Die Gleichungen 2-5 und 2-6 enthalten die geometrische Entfernung ρ_i^k , die eine Funktion der unbekanntenen Empfänger-Position und der bekannten Satellitenposition ist. Über die Broadcast-Navigations-Nachrichten werden die Position der Satelliten und der Uhrfehler δ_i^k ermittelt. Nach Angaben des IGS liegt die Genauigkeit der Broadcast-Navigationsnachrichten bei wenigen Metern und der Uhrfehler im Bereich von 5 ns. Der IGS bietet jedoch verschiedene genauere Orbit- und Uhrdaten (ausführlicher wird dies in Kapitel 3 beim Thema Fehlerbetrachtung behandelt). Diese können im Rahmen einer Postprozessierung verwendet werden. Der Empfängeruhrfehler spielt eine große Rolle im Positionierungsfehlerbudget. Da die meisten Empfänger Quarz-Crystal-Oszillatoren nutzen, erreicht der Empfängeruhrfehler bis zu 1 ms (ca. 2 m im Positionsfehler-Budget). In dieser Studie wird dieser Fehler durch die doppelte Differenzierung komplett eliminiert (mehr dazu im Abschnitt 2.4).

Das Streckenrauschen, ein Teil von ε_{pi}^k , verursacht einen Positionsfehler von bis zu 0,6 m bei herkömmlichen GNSS-Signalen und nur ca. 0,01 m bei Galileo E5 (siehe Abschnitt 2.1). Im Vergleich hierzu hat das Trägerphasenrauschen einen Fehler im Bereich von 0,5 bis 0,9 mm zur Folge. Mehrwegeeffekte sind ebenfalls Teile der Größen ε_{pi}^k und $\varepsilon_{\phi_i}^k$ in den Gleichungen (2-5) und (2-6) und sind Effekte, die durch die Reflexion der Satellitensignale (Radiowellen) an Objekten (Gebäude, metallische Gegenstände...) zustande kommen. Mehrwegeeffekte beeinflussen Codestreckenmessungen stärker als Trägerphasenmessungen. Nach Untersuchungen von IRISGLER [2008] beträgt der Effekt bei Galileo E5 nur 0,05 m im offenen Gelände und 0,3 m im städtischen Bereich, was den niedrigsten Mehrwegeeinfluss aller GNSS-Signale darstellt (z.B. bei GPS L1 0,3 m im offenen Gelände und 5 m im städtischen Bereich). Der Mehrwegeeffekt ist einer der Hauptgründe, warum Code-Pseudostreckenmessungen eine untergeordnete Rolle bei präzisen Positionierungsaufgaben spielen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der GNSS-Signale wird in der Atmosphäre verringert. Die dadurch entstehenden Laufzeitverzögerungen werden hauptsächlich durch die Ionosphäre und die Troposphäre verursacht:

- Die Ionosphäre ist der höhere Teil der Erdatmosphäre. So definiert LANGLEY [1998] die Ionosphäre als denjenigen Teil der Erdatmosphäre, in dem genug freie Elektronen existieren, um die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen nachhaltig zu beeinflussen. In den Gleichungen (2-5) und (2-6) kann die ionosphärische Laufzeitverzögerung δI_i^k bis zu 30 m betragen.

Die Ionosphäre ist ein dispersives Medium¹⁹. Die ionosphärische Laufzeitverzögerung kann aufgrund der starken Variabilität in den Ionosphärenschichten nicht genauer modelliert werden. Die gängigen Modelle (Klobuchar, NeQuick etc.) können nach SEEBER [1989] nur bis zu 50 % der Laufzeitverzögerung 1. Ordnung eliminieren. Für Galileo wird das Modell NeQuick 2²⁰ eingesetzt werden, um ionosphärische Korrekturen auf Einfrequenz-Messungen vorzunehmen. Das NeQuick 2-Modell verhält sich weitgehend etwas besser als das Klobuchar-Modell. Im Abschnitt 2.3 wird die ionosphärische Laufzeitverzögerung detaillierter behandelt.

- Die Troposphäre ist gemäß der Einteilung der Erdatmosphäre nach der Temperatur die untere Schicht. Die verursachte Laufzeitverzögerung δT_i^k durch die Troposphäre in den Gleichungen (2-5) und (2-6) beträgt je nach lokalen atmosphärischen Gegebenheiten wie Luftdruck, Luftfeuchtigkeit und Temperatur bis zu 2,5 m in Zenitrichtung. Die Troposphäre ist ein nicht-dispersives Medium für GNSS-Signale, dadurch ist der Fehler frequenzunabhängig und kann nicht durch Frequenzkombinationen eliminiert werden. Im Kapitel 3 wird detailliert auf die Kompensationsmöglichkeiten dieses Fehlers eingegangen.

2.2.2 Positionsbestimmung

2.2.2.1 Absolute Positionierung

Die absolute Positionierung (engl. Point Positioning) besteht aus der Bestimmung der dreidimensionalen Koordinaten eines Empfängers in einem Bezugssystem (im Fall von Galileo in GTRF: Galileo Terrestrial Reference Frame). Dafür berechnet der Empfänger aus der Laufzeit des Signals die Entfernung zwischen Satellit und Empfänger (die sogenannte Pseudostrecke). Hierfür benötigt er die Auskunft über die Positionen von mindestens 4 Satelliten. Die ersten drei Gleichungen reichen für die Bestimmung der 3D-Koordinaten des Punktes. Die vierte Gleichung dient zur Bestimmung des Empfängeruhrfehlers. Die Gleichungen lauten wie folgt:

$$PR_i^k = \sqrt{(X^k - X_i)^2 + (Y^k - Y_i)^2 + (Z^k - Z_i)^2} + c \cdot (\delta t_i - \delta t_i^k) \quad (2-7)$$

P_i^k : Geometrische Strecke von Empfänger i zum Satelliten k

X^k, Y^k, Z^k : Koordinaten des Satelliten

X_i, Y_i, Z_i : Koordinaten des Empfängers

$\delta t_i, \delta t_i^k$: Empfängeruhrfehler und Satellitenuhrfehler

¹⁹Ein dispersives Medium ist ein Medium, in dem die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen von der Frequenz abhängig ist, SEEBER [1989].

²⁰Nach FARAH A.M.A. gibt das NeQuick-Modell die Elektronengehaltsverteilung (TEC: „Total Electron Content“) sowohl auf der Unterseite und als auch auf der Oberseite der Ionosphäre an. Das NeQuick wurde beim ESA EGNOS-Projekt für Analysezwecke genutzt. Die Grundeingabeparameter des Modells sind geographische Koordinaten, Epoche, Solaraktivitätenindex und Werte für foF2 und M(3000)F2.

Die Abbildung 2-6 zeigt das Prinzip der absoluten Positionierung:

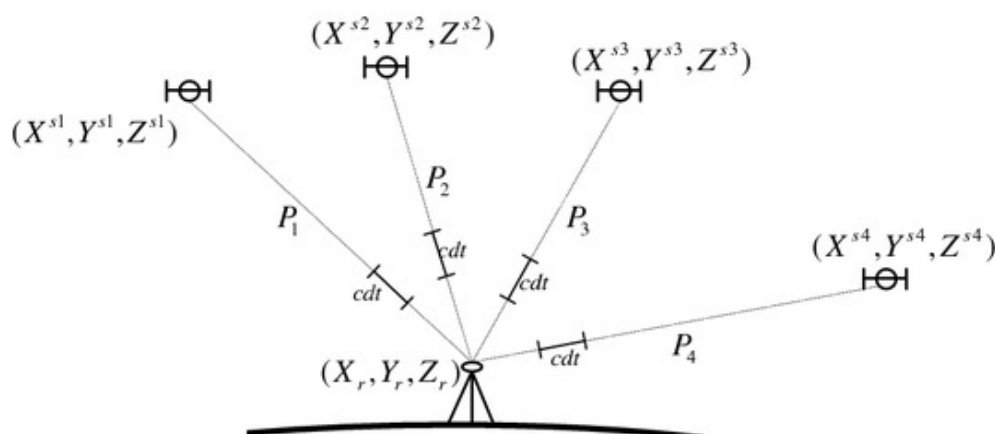


Abbildung 2-6: Absolute Positionierung

Die Genauigkeit der absoluten Punktbestimmung hängt von der Genauigkeit der Bahn- und Uhrinformationen der Satelliten und der Ionosphären- und Troposphärenmodellierung, von der Höhe des Messrauschens und von der Geometrie der Satellitenkonstellation ab.

Es gibt hauptsächlich zwei Methoden der absoluten Punktbestimmung. Zum einen das sog. „Single Point Positioning“ (SPP, Einzelpunktbestimmung), das Beobachtungen von Code-Pseudostrecken zu mindestens 4 Satelliten nutzt, um die Position zu berechnen. Die Positionsgenauigkeit liegt bei Verwendung von Broadcast-Navigationsdaten und einfachen ionosphärischen Modellen bei 5-20 m. Zum anderen das „Precise Point Positioning“ (PPP, Präzise Punktbestimmung), die die ionosphärenfreie lineare Kombination von Code- oder Trägerphasenmessungen nutzt, um präzise Koordinaten bestimmen zu können. Diese Methode benötigt präzise Orbit- und Uhrinformationen und erreicht Genauigkeiten im cm-Bereich (siehe KOUBA und HÉROUX, [2001]).

2.2.2.2 Relative Positionierung

Die relative Positionierung, auch differentielle Positionierung genannt, ist eine Positionierungsmethode, die die Genauigkeit der Koordinaten verbessert, indem die gemessenen Laufzeiten von verschiedenen Empfängern kombiniert werden. Die Methode nutzt ein Minimum von zwei Empfängern, wovon mindestens einer eine Referenzstation ist. Diese Empfänger müssen dieselben Satelliten gleichzeitig verfolgen, um die relativen Koordinaten bestimmen zu können. Dabei werden Differenzen zwischen den Beobachtungsgleichungen der einzelnen Stationen gebildet. Die Differenzierung eliminiert bzw. reduziert zumindest alle gleichartigen Fehlerbiases signifikant, die während der Beobachtung derselben Satelliten entstanden sind. Dabei müssen die genauen Koordinaten der Referenzstation bekannt sein. Darüber hinaus muss für eine Synchronisation der Daten gesorgt werden. Die Synchronisation der Messungen muss bis auf eine Mikrosekunde genau sein. Nach SCHÜLER [2006] führen moderne Empfänger diese Synchronisation auf die GNSS-Zeitskala selbständig mit ausreichender Genauigkeit durch, da sie ihren Uhrfehler ständig bestimmen und nachführen.

Üblicherweise werden die Beobachtungsdifferenzen nach Einfach-, Doppel- und Dreifachdifferenzen eingeteilt. Bei der Einfachdifferenz wird die relative Position zwischen zwei Empfängern (i, j) durch simultane Beobachtungen zu demselben Satelliten k berechnet. Dabei wird der Satellitenuhrfehler eliminiert. Die Doppeldifferenz wird dann durch die Differenz von zwei Einfachdifferenzen zu zwei unterschiedlichen Satelliten k und l gebildet²¹ (siehe Abbildung 2-7). Die unten aufgeführten Formeln drücken die Doppeldifferenz für Code- und Trägerphasenmessungen aus:

$$\begin{aligned}\nabla\Delta PR_{ij}^{kl} &= \Delta PR_{ij}^k - \Delta PR_{ij}^l = PR_j^k - PR_i^k - PR_j^l + PR_i^l \\ \nabla\Delta PR_{ij}^{kl} &= \nabla\Delta\rho_{ij}^{kl} + \delta\nabla\Delta I_{ij}^{kl} + \delta\nabla\Delta T_{ij}^{kl} + \nabla\Delta\varepsilon_{p_{ij}}^{kl}\end{aligned}\quad (2-8)$$

$\nabla\Delta PR_{ij}^{kl}$: Doppeldifferenz der Codemessung

Und

$$\begin{aligned}\nabla\Delta\Phi_{ij}^{kl} &= \Delta\Phi_{ij}^k - \Delta\Phi_{ij}^l = \Phi_j^k - \Phi_i^k - \Phi_j^l + \Phi_i^l \\ \nabla\Delta\Phi_{ij}^{kl} &= \nabla\Delta\rho_{ij}^{kl} + \nabla\Delta\lambda \cdot N_{ij}^{kl} - \delta\nabla\Delta I_{ij}^{kl} + \delta\nabla\Delta T_{ij}^{kl} + \nabla\Delta\varepsilon_{\Phi_{ij}}^{kl}\end{aligned}\quad (2-9)$$

$\nabla\Delta\Phi_{ij}^{kl}$: Doppeldifferenz der Phasenmessung

Die wichtigste Eigenschaft der doppelten Differenzen ist die komplette Beseitigung der Uhrfehler (Satellitenuhr- und Empfängeruhrfehler) aus den Beobachtungsgleichungen. Jedoch bleibt anzumerken, dass hierbei Restfehler entstehen können. Somit müssen die Uhrfehler bei der präzisen Positionsberechnung vorsichtig betrachtet werden.

Die atmosphärischen Effekte werden stark reduziert, wenn die Stationen unweit voneinander entfernt sind (bis zu 10 km). Dies ist in der Tatsache begründet, dass die GNSS-Signale bei kurzen Basislinien beinahe dieselben ionosphärischen und troposphärischen Bedingungen durchlaufen. Bei der doppelten Differenzbildung aus Trägerphasenmessungen tritt der neue unbekannte doppelte differenzierte Mehrdeutigkeitsterm $\nabla\Delta \cdot N_{ij}^{kl}$ auf. Dieser Term muss gelöst werden, um präzise Pseudostreckenerhalten zu können. Im Abschnitt 2.7 wird die Thematik der Lösung der Mehrdeutigkeit ausführlich behandelt.

Die Differenzbildung erhöht den Pegel des Messrauschens²². Bei der Doppeldifferenzbildung ist dieses um den Faktor 2 größer als bei der originalen Messung. Dazu kommen noch Korrelationen zwischen den differenzierten Messgrößen.

²¹ Generell wird der Satellit mit dem größeren Elevationswinkel als Referenzsatellit bei der Doppeldifferenz ausgewählt.

²² Das Messrauschen steigt um den Faktor $\sqrt{2}$ bei jeder steigenden Differenzbildung.

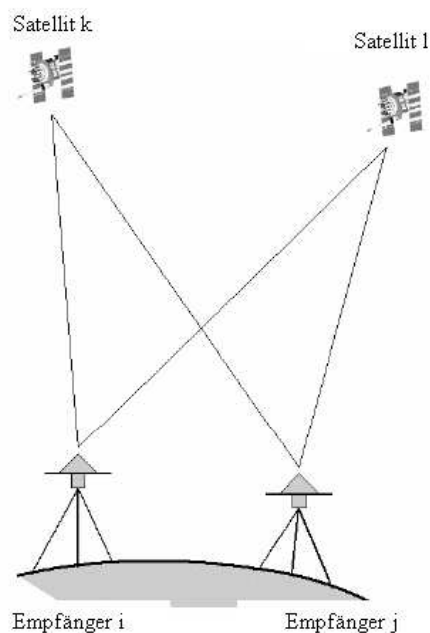


Abbildung 2-7: Doppeldifferenz-Bildung

Abhängig von der Art der Beobachtungsgröße werden verschiedene relative Positionierungsmethoden definiert. Das „Differential GNSS (DGNSS)“ basiert auf Codestreckenmessungen und kann in Echtzeit oder mittels einer Postprozessierung Ergebnisse im Meter- bis Dezimeter-Bereich liefern. Mit den Trägerphasenmessungen können entweder kinematische oder statische Messungen durchgeführt werden. Diese Messungen sind um einiges genauer als bei der DGNSS-Methode (cm-mm Bereich).

Präzise GNSS-Positionierungsmethoden verwenden Trägerphasenmessungen aufgrund von deren geringen Messrauschen. Die relative Trägerphasen-Positionierung bezieht sich auf die doppelte Differenzierung der Gleichung 2-9 und kann sowohl in Echtzeit als auch mittels einer Postprozessierung durchgeführt werden. Der Schlüssel für eine schnelle und hochpräzise relative Positionierung setzt die Lösung der doppelten differenzierten Mehrdeutigkeiten voraus. Nach RIZOS [1999] hängt die Mehrdeutigkeitsauflösung von einigen äußeren Faktoren wie der Länge der Beobachtungszeit, der Basislinienlänge, der Satellit-zu-Empfänger-Geometrie, den atmosphärischen Effekten und den Mehrwegeeffekten ab. Relative Trägerphasen-Positionierungen werden entweder statisch oder kinematisch durchgeführt. Die statische Trägerphasen-Positionierung ist die präziseste GNSS-basierte Positionierungstechnik, die heute im Einsatz ist. Die Beobachtungszeiten variieren zwischen 20 Minuten und einem Tag. Die Genauigkeit der Positionen ist vom Abstand zwischen den zwei Empfängern, der Anzahl der sichtbaren Satelliten und der Satellitengeometrie abhängig. Weitere Faktoren, die die Genauigkeit der statischen Positionen beeinflussen, sind die Art des Empfängers (Ein- oder Multifrequenz), die Anzahl der Referenz-Empfänger, die Präzision der a-priori-Orbitdaten und die Länge des Beobachtungszeitraums.

Hiergegen ist die kinematische Positionierung bei weitem weniger genau. Sie wird verwendet, um die Position eines Empfängers (oft in Bewegung) bei Aufwendung nur weniger Messepochen zu bestimmen. Dabei bewegt sich der Empfänger von einem Punkt zu einem anderen, ohne ausgeschaltet zu werden.

In der Regel wird eine Datenrate von 1 Hz für die Beobachtung verwendet. Um so viele Fehlerquellen wie möglich zu mitigieren, sollten die verwendeten Basislinien nicht länger als 10-15 km sein, damit die erwartete Positionierungsgenauigkeit in der Größenordnung von 2 bis 5 cm erreicht werden kann. Die postprozessierte kinematische Positionierung wird als konventionelle kinematische Positionierung bezeichnet, während die Positionierung in Echtzeit als RTK („Real-Time-Kinematik“)-Positionierung bezeichnet wird. Die nächste Tabelle fasst herkömmliche Positionierungsmethoden mit ihren Genauigkeiten zusammen:

Positionierungsmethoden	Beobachtungsgröße	Basislinienlänge	Beobachtungszeit	Bahn-und Uhrdaten	Prozessierungs-Wartezeit	Genauigkeit
Absolute Positionierung						
SPP	Einfrequenz Code-messung		Einzelepoch 1 s	broadcast	Echtzeit	20 m
PPP	Zweifrequenz Phasenmessung		Einzelepoch 1 d/ 1s–30s	IGS	Postprozessierung	sub-cm – 10 cm
Relative Positionierung						
DGNSS	Einfrequenz Code-messung	0-500 km	Einzelepoch 10s-1min	broadcast	Echtzeit	0.67 m/100 km
	Zweifrequenz Code-messung	0-1000 km	Einzelepoch 10s– 1min.	broadcast	Echtzeit	0.7 to 3 m,
Kinematisch	Einfrequenz-Phasenmessung	0-5 km	Einzelepoch 1 s.	broadcast	Echtzeit	1 dm + 3 ppm
	Zweifrequenz-Phasenmessung	0–10 to 15 km	Einzelepoch 1 s.	broadcast	Echtzeit	1 cm + 2 ppm
Statisch	Zweifrequenz-Phasenmessung	15–100 km	1h–4h/ 10–30 s.	broadcast	Postprozessierung	2 mm + 10 ⁻⁶ D
		15–100 km	1h–4h/ 10–30 s.	IGS final	Postprozessierung	2 mm + 10 ⁻⁷ D
		up to 2000 km	1 day/ 10-30 s.	IGS final	Postprozessierung	1 mm+ several 10 ⁻⁸ D

Tabelle 2-5: Überblick über verschiedene Positionierungsmethoden und deren erzielte Genauigkeiten

2.3 Die Ionosphäre als größte Hürde zur präzisen Positionierung

Wie in Abschnitt 2.2.1 bereits erwähnt, trägt die ionosphärische Refraktion maßgeblich zum Fehlerbudget der Positionierung bei. Dies liegt an der Interaktion dieser atmosphärischen Schicht mit elektromagnetischen Signalen. In den folgenden Abschnitten wird die ionosphärische Laufzeitverzögerung abgeleitet und ihre Wirkung auf die GNSS-Beobachtungsgrößen erläutert.

2.3.1 Die Ionosphäre

Die Grenzen der Ionosphäre sind nicht fest definiert, da sie zeitlichen und räumlichen Veränderungen unterworfen sind. Die Ionosphäre erstreckt sich schätzungsweise ab einer Höhe über der Erdoberfläche von ca. 60 km bis zu einer Höhe von mehr als 1000 km. Sie besteht zum großen Teil aus Ionen.

Die Ionisierung der Atmosphäre wird von der Sonne verursacht, deren Ultraviolett- und Röntgenstrahlung in der Ionosphäre von den dort vorhandenen neutralen Atomen und Molekülen absorbiert wird. Dabei entstehen freie Elektronen und Ionen. Der Grad der Ionisation ist von der Intensität der Sonnenstrahlung abhängig. Mit steigender Höhe nimmt die Strahlungsintensität der Sonne zu und die Dichte an Gasmolekülen ab, wodurch auch der Elektronengehalt beeinflusst wird. Die Höhe der maximalen Elektronendichte ergibt sich bei etwa 300 km Höhe, siehe Abbildung 2-8. Hier ereignet sich auch der größte ionosphärische Einfluss auf die GNSS-Signale.

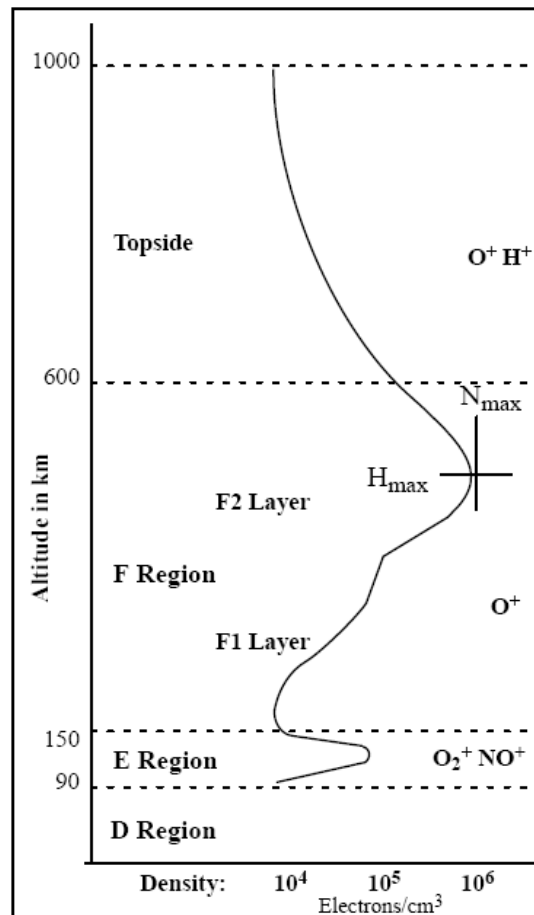


Abbildung 2-8: Aufbau der Ionosphäre; siehe ANDERSON UND FULLER-ROWELL [1999]

2.3.2 Die ionosphärische Refraktion auf das E5-Signal

Die ionosphärische Refraktion beruht auf der Wechselwirkung der GNSS-Signale mit den freien Elektronen in der Atmosphäre. Beim Durchlauf durch das dispersive Medium, das die Ionosphäre darstellt, werden die elektromagnetischen Wellen gebrochen. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen in der Ionosphäre von der Frequenz abhängig ist, treten unterschiedliche Brechungsindices bzw. unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten auf. Es lässt sich zwischen Phasen- und Gruppenausbreitungsgeschwindigkeiten unterscheiden. Bei Galileo, wie auch bei allen anderen GNSS, breiten sich die Phasensignale mit der Phasengeschwindigkeit und die Codesignale, die aus der Trägerwelle und dem Code-Signal zusammengesetzt sind, mit der Gruppengeschwindigkeit aus.

Es existiert eine Beziehung zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit und dem Brechungsindex. Nach XU [2003] charakterisiert der Brechungsindex n , wie die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals in einem Medium mit Bezug auf die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum verzögert oder beschleunigt wird. Die Phasengeschwindigkeit der Phasen mit einheitlichen Wellen kann mit:

$$c_{Phase} = \lambda \cdot f \quad (2-10)$$

c_{Phase} : Phasenausbreitungsgeschwindigkeit

λ : Wellenlänge

f : Trägerfrequenz

ausgedrückt werden und wird im Zusammenhang mit dem Brechungsindex folgendermaßen zusammengefasst:

$$n_{Phase} = \frac{c_0}{c_{Phase}} \quad (2-11)$$

n_{Phase} : Brechungsindex für die Phasenausbreitung

c_0 : Geschwindigkeit im Ausbreitungsmedium

c_{Phase} : Phasenausbreitungsgeschwindigkeit

Analog ist die Gruppengeschwindigkeit die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Wellengruppe, die durch die Überlagerung von mehreren Wellenzügen mit verschiedenen Frequenzen entsteht. Diese Geschwindigkeit lässt sich in Verbindung mit dem Brechungsindex mit folgender Formel verdeutlichen:

$$n_{Gruppe} = \frac{c_0}{c_{Gruppe}} \quad (2-12)$$

n_{Gruppe} : Brechungsindex für die Phasenausbreitung

c_0 : Geschwindigkeit im Ausbreitungsmedium

c_{Gruppe} : Phasenausbreitungsgeschwindigkeit

Ein Zusammenhang zwischen den beiden Brechungsindices lässt sich nach MISRA und ENGE [2001] folgendermaßen beschreiben:

$$n_{Gruppe} = n_{Phase} + f \cdot \frac{dn_{Phase}}{df} \quad (2-13)$$

f : Trägerfrequenz

Die Beziehung ist eine Approximation 1. Ordnung und bewirkt demzufolge eine Verzögerung der GNSS-Code-Signale (Codestreckenmessungen sind länger) und eine Beschleunigung der Trägerphasenwellen (Phasenmessungen sind kürzer).

Der Phasenbrechungsindex n_{Phase} kann näherungsweise wie folgt beschrieben werden (siehe XU, [2003]):

$$n_{Phase} = 1 + \frac{c_1}{f^2} + \frac{c_2}{2 \cdot f^3} + \frac{c_3}{3 \cdot f^4} + \dots \quad (2-14)$$

Die Koeffizienten $c_1, c_2, c_3 \dots$ sind von der elektronischen Dichte N_e abhängig und können hiermit bestimmt werden. Eine Kombination der Gleichungen (2-13) und (2-14) ergibt:

$$n_{Gruppe} = 1 - \frac{c_1}{f^2} - \frac{c_2}{f^3} - \frac{c_3}{f^4} \dots \quad (2-15)$$

Die Änderung in der Länge des Signal-Laufweges in einem Medium mit Brechungsindex n lässt sich allgemein mit einer Integration entlang des Weges formulieren:

$$\Delta r = \int (n - 1) \cdot ds \quad (2-16)$$

Ausgehend von (2-16) ergeben die ionosphärischen Effekte auf Phasen- und Codemessungen folgende Gleichungen:

$$Ion_{Phase} = \int (n_{Phase} - 1) \cdot ds = \int \left(\frac{c_1}{f^2} + \frac{c_2}{2 \cdot f^3} \dots \right) \cdot ds \quad (2-17)$$

$$Ion_{Gruppe} = \int (n_{Gruppe} - 1) \cdot ds = \int \left(-\frac{c_1}{f^2} - \frac{c_2}{f^3} \dots \right) \cdot ds$$

Wie aus den Formeln zu entnehmen ist, drückt sich die ionosphärische Refraktion in verschiedenen Ordnungen aus. Der Ionosphäreneffekt 1. Ordnung ist der Hauptfehlereinfluss auf die Signalverbreitung und bewirkt Abweichungen von mehreren Metern bei den Positionsergebnissen. Er wird durch die freien Elektronen in der Ionosphäre verursacht und wird berechnet, indem in die nächste Gleichung nur der erste Entwicklungskoeffizient c_1 eingesetzt wird:

$$Ion_{Phase} = -Ion_{Gruppe} = \int \left(\frac{c_1}{f^2} \right) \cdot ds \quad (2-18)$$

Der ionosphärische Fehler 1. Ordnung unterscheidet sich bei Phasen- und Codemessungen nur im Vorzeichen. De facto sind die beiden jedoch gleich groß. Der Koeffizient c_1 kann näherungsweise berechnet werden und ergibt nach SEEBER [1993]:

$$c_1 = -40.3 \cdot N_e \quad (2-19)$$

N_e : Elektron-Dichte

Damit wird die ionosphärische Refraktion 1. Ordnung ungefähr wie folgt abgeleitet:

$$Ion_{Phase} = -Ion_{Gruppe} = \frac{40.3 \cdot TEC}{f^2} \quad (2-20)$$

TEC (Total Electron Content) ist der Elektroneninhalt in Zenitrichtung und wird anhand folgender Formel ermittelt:

$$TEC = \int_{Zenit} N_e \cdot ds \quad (2-21)$$

Die ionosphärischen Refraktionen höherer Ordnung sind nur schwer modellierbar. Der Ionosphärenfehler 2. Ordnung wird vom Magnetfeld der Erde verursacht. Dieser Fehler ist um einiges kleiner als der Fehler 1. Ordnung und liegt nur im Subzentimeter-Bereich bzw. beträgt bei schwacher Ionosphärentätigkeit sogar nur einige Millimeter. Der Fehler 3. Ordnung liegt im Millimeter- bis Submillimeter-Bereich und wird bei den meisten GNSS-Anwendungen nicht berücksichtigt²³.

Aufgrund der Tatsache, dass die Ionosphäre ein dispersives Medium ist, werden die verschiedenen Signal-Komponenten des breitbandigen Galileo E5 AltBOC-Signals während seines Laufs durch die Ionosphäre verzögert, (siehe GAO et al. [2007]). Breitbandige Signale werden ergo durch die Ionosphäre stärker beeinflusst als andere Signale, selbst wenn diese Signale mit genaueren Tracking-Eigenschaften, weniger Coderauschen-Anfälligkeit und weniger Multipath-Effekten implementiert worden sind. Um präzise Positionen errechnen zu können, muss die Problematik der ionosphärischen Refraktion gelöst werden. Herkömmliche Ansätze sind diesbezüglich entweder die Einführung eines bekannten Ionosphärenmodells (NeQuick²⁴, IONEX Maps), das jedoch nur einen Teil des Fehlers eliminiert (siehe SEEBER, [2003]), oder die Bildung einer ionosphärenfreien Linearkombination, die den Einsatz teurer Zweifrequenz-Empfänger voraussetzt. In dieser Studie wird eine Methode unter Kombination von Einfrequenz-, Code- und Trägerphasenmessungen zur Eliminierung der ionosphärischen Refraktion 1. Ordnung vorgestellt. Aufgrund der oben genannten Eigenschaften des breitbandigen Galileo AltBOC E5-Signals wird angenommen, dass die Positionierungsergebnisse verbessert werden und somit die Anforderungen für die präzise Positionierung erfüllt werden können.

2.4 Code-Plus-Carrier (CPC)-Methode

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der präzisen Einfrequenz-Positionierung. Wegen seiner vielversprechenden Eigenschaften wird angenommen, dass mit dem Galileo E5-Signal sehr genaue Messungen erzielt werden können und so Nutzer von E5-Einfrequenz-Empfängern von einer Positionierungsgenauigkeit profitieren werden, die bisher nur mit Zweifrequenz-Empfängern machbar ist.

²³ BASSIRI and HAJJ [1993] behandeln die ionosphärischen Effekte höherer Ordnung ausführlich.

²⁴ Das NeQuick-Modell ist ein ionosphärisches Profiler, das zu einem bestimmten Zeitpunkt und Ort die Elektronendichte in der Ionosphäre der Erde berechnet, ESA Galileo-Projekt

Nachfolgend werden einige Grundkenntnisse über die entwickelten Algorithmen für die Einfrequenz-Positionierung vorgestellt. Das Grundprinzip dabei beruht auf der additiven Kombination von Code- und Trägerphasenbeobachtungen, die den ionosphärischen Einfluss aus der entstehenden Beobachtungsgröße eliminiert.

2.4.1 Die Methodologie

Die Beobachtungsgleichungen der Code- und Trägerphasenmessung sind bekannt und lassen sich vereinfacht folgendermaßen darstellen:

$$PR = \rho + \delta I + \delta T + \delta M_{Code} + \varepsilon_{Code} \quad (2-22)$$

und

$$\Phi = \rho - \lambda \cdot N - \delta I + \delta T + \delta M_{Phase} + \varepsilon_{Phase} \quad (2-23)$$

PR steht für die Code-Pseudostreckenmessung, ρ ist die geometrische Entfernung zwischen Empfänger und Satellit, δI ist die ionosphärische und δT die troposphärische Laufzeitverzögerung, Φ ist die Trägerphasenmessung in metrischer Einheit, λ ist die Wellenlänge der Trägerfrequenz, N ist der Mehrdeutigkeitsterm, der noch durch Fehler-Biases in einem undifferenzierten Modus beeinflusst ist. δM ist der durch Mehrwegeeffekte verursachte Fehler und ε drückt zusätzliches Codestrecken- oder Trägerphasenrauschen aus.

Die Methode der Kombination des „Code-Plus-Carrier (CPC)“ nutzt die unterschiedliche Wirkung der Ionosphäre auf Code- und Trägerphasenmessungen. In der Tat ist der Betrag des durch die Ionosphäre entstandenen Fehlers 1. Ordnung bei der Codemessung gleich wie bei der Trägerphasenmessung (siehe Gleichung (2-18)). Die beiden Fehler unterscheiden sich jedoch in ihrem Vorzeichen. Zur Bildung der CPC-Kombination werden die beiden Beobachtungsgleichungen addiert, womit die ionosphärische Komponente beseitigt wird:

$$CPC = \frac{PR + \Phi}{2} = \rho - \frac{\lambda}{2} \cdot N + \delta T + \frac{\delta M_{Code} + \delta M_{Phase}}{2} + \frac{\varepsilon_{Code} + \varepsilon_{Phase}}{2} \quad (2-24)$$

$$CPC = \rho - \frac{\lambda}{2} \cdot N + \delta T + \delta M_{CPC} + \varepsilon_{CPC}$$

Danach wird die Beobachtungsgröße halbiert, damit die geometrische Entfernung wieder in einfacher Form vorliegt. Daraus ergibt sich die Besonderheit, dass die Mehrdeutigkeit sowie die additiven Mehrwegeeffekte und das additive Messrauschen in halbiertem Form auftreten. Aus der Gleichung (2-24) ist der Ionosphärenterm verschwunden, was auf eine komplette Beseitigung der ionosphärischen Laufzeitverzögerung schließen lässt.

Tatsächlich handelt es sich jedoch nur um die Eliminierung des Ionosphärenfehlers 1. Ordnung. Nach BASSIRI und HAJJ [1993] werden die Fehler 1., 2. und 3. Ordnung (siehe Gleichung (2-13)) in den Gleichungen der Codestrecken- und Trägerphasenmessung (2-18) und (2-19) unter Vernachlässigung anderer Fehlerquellen wie folgt ausgedrückt:

$$PR = \rho + \left(\frac{c_1}{f^2} + \frac{c_2}{f^3} + \frac{c_3}{f^4} \right) \quad (2-25)$$

$$\Phi = \rho - \frac{\lambda}{2} \cdot N - \left(\frac{c_1}{f^2} + \frac{c_2}{2 \cdot f^3} + \frac{c_3}{3 \cdot f^4} \right)$$

Die CPC-Kombination ergibt somit vereinfacht:

$$CPC = \frac{PR + \Phi}{2} = \rho - \frac{\lambda}{2} \cdot N + \left(\frac{c_2}{4 \cdot f^3} + \frac{c_3}{3f^4} \right) \quad (2-26)$$

Es wird ersichtlich, dass die ionosphärischen Effekte höherer Ordnung in der neuen CPC-Gleichung erhalten bleiben. Diese treten jedoch vermindert auf und können bei der CPC-Genauigkeitsanforderung (im cm-Bereich) vernachlässigt werden. Restliche Störfaktoren wie die troposphärische Laufzeitverzögerung, die Mehrwegeeffekte usw. sind weiterhin Teil der Beobachtung. In Kapitel 3 werden deren Einflüsse dargestellt und Wege zu ihrer Dämpfung vorgestellt.

Im Gegensatz zur herkömmlichen Codestreckenmessung muss zusätzlich mit den unbekanntem Parametern der Mehrdeutigkeit (wie bei Trägerphasenmessungen) umgegangen werden. Im Normalfall erfordert dies eine längere Beobachtungszeit, um eine ausreichende Konvergenz der Mehrdeutigkeitsparameter zu ermöglichen. Die Konvergenzzeit kann verbessert werden, indem sogenannte Koordinaten-„Constraints“²⁵ eingeführt werden. Dies ist in der Regel nützlich, wenn man versucht, Mehrdeutigkeiten in Beobachtungszeiträumen kürzer als etwa 1 Stunde aufzulösen. Es können Koordinaten aus gewöhnlichen differentiellen Codestreckenmessungslösungen (DGNSS-Lösungen) als „Constraints“ verwendet werden. Diese Koordinaten werden a priori auf den Vektor der Beobachtungen L als Pseudo-Beobachtungen hinzugefügt:

$$L = [CPC_1 \quad CPC_2 \quad \dots \quad CPC_n \mid X \quad Y \quad Z] \quad (2-27)$$

²⁵ Constraints sind a priori Kennwerte, die in dem stochastischen Modell festgelegt werden. Sie wirken als Schutzmaßnahmen, um eine Divergenz des Filters zu vermeiden, wenn zu wenige Satelliten beobachtet werden bzw. eine ungünstige Satellitenkonstellation vorliegt.

Dabei repräsentiert CPC_i die „Code-plus-Carrier“-Beobachtungsgrößen wie in Gleichung (2-24) und X, Y, Z die a priori-Koordinaten-, „Constraints“.

Nach Untersuchungen von BONA [2000] können die Codestrecken- und Trägerphasenmessungen als unkorreliert angesehen werden. Damit ergibt die Standardabweichung der neuen Beobachtung nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz folgendes:

$$\sigma_{CPC} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma_{PR}^2 + \sigma_{\Phi}^2} \approx \frac{\sigma_{PR}}{2} \quad (2-28)$$

Die Standardabweichung von CPC entspricht dann annähernd der Hälfte des Rauschens der Codestreckenmessung. Eine Untersuchung von SCHÜLER et al., [2010] ergab, dass mit GPS L1 die CPC-Positionierung Genauigkeiten im 20 cm-Bereich erzielen kann. Mit Galileo E5 ist aufgrund der oben genannten Eigenschaften des E5 AltBOC-Signals eine deutliche Steigerung der Genauigkeit zu erwarten. In Kapitel 6 werden verschiedene Beobachtungsszenarien in unterschiedlichen Regionen untersucht, um Schlussfolgerungen über die tatsächliche Güte der Einfrequenzmessung mit E5 zu treffen.

2.4.2 Eigenschaften der neuen Beobachtungsgleichung CPC

Bei der Methode werden im Prinzip zwei unterschiedliche Beobachtungen zusammengeführt. Dabei entsteht eine neuartige Beobachtungsgröße, die folgende Eigenschaften aufweist:

- Die CPC-Beobachtungsgröße ist frei von der ionosphärischen Laufzeitverzögerung 1. Ordnung. Dies ist wichtig für die präzise Positionierung mit Einfrequenz-Empfängern über mittlere und lange Basislinien, bei denen der Ionosphärenfehler die Positionierungsgenauigkeit drastisch verschlechtern kann. Es kann auch beobachtet werden, dass Ionosphäreneffekte höherer Ordnung abgemildert auftreten (siehe Gleichung (2-26)): Nur noch 25 % des Ionosphärenfehlers 2. Ordnung und 33 % des Fehlers 3. Ordnung verbleiben in der CPC-Beobachtungsgröße, verglichen mit den originalen Codestreckenmessungen. Im Vergleich hierzu verbleiben bei der Trägerphasenmessung 50 % des Fehlers 2. Ordnung und 3. Ordnung nach der Bildung der ionosphärenfreien Linearkombination.
- Die CPC-Beobachtungsgröße enthält weiterhin Mehrdeutigkeitsparameter. Diese zusätzlichen Parameter verlangsamen die Konvergenzzeit der Position erheblich. Die Beobachtungen müssen über einen gewissen Zeitraum hinweg erfolgen, damit präzise Ergebnisse erzielt werden können. Bei früheren Studien mit GPS L1 stellte sich heraus, dass Koordinaten mit einer Genauigkeit im Submeter-Bereich nach ca. 30 min erzielt werden können. Es ist aber zu erwarten, dass diese Genauigkeit mit Galileo E5-Daten wesentlich erhöht wird. Die Konvergenzzeit bei der CPC-Methode ist aber trotzdem eine Hürde für viele präzise Positionierungsapplikationen.

- Selbst wenn das Codestreckenrauschen bei Galileo E5-Codestreckenmessungen im Vergleich zu anderen Signalen relativ gering ist, bleibt dieses Rauschen immer noch höher als das bei Trägerphasenmessungen.

Das Rauschen beträgt bei der CPC-Bildung etwas mehr als die Hälfte des Codemessrauschens. Diese Gegebenheit wird auch die Konvergenzzeit der Parameter beeinflussen.

- Mehrwegeeffekte (Multipath) beeinflussen Codestreckenmessungen stärker als Trägerphasenmessungen. Im schlimmsten Fall bewegt sich der durch Multipath verursachte Fehler bei Codemessungen im Meter-Bereich im Vergleich zu einem Fehler lediglich im Zentimeter-Bereich bei der Galileo E5-Trägerphasenmessung. Der Multipath-Fehler kann somit um einiges höher ausfallen als das Codestreckenrauschen. Deshalb muss die Beobachtungszeit verlängert werden, um diese Fehler mit der Zeit zu mitigieren und ein besseres Genauigkeitsniveau zu erreichen. Alternativ können auch direkt verschiedene Mitigationsverfahren angewendet werden, um den Multipath-Fehler zu reduzieren (siehe Abschnitt 3.2.4.2).

Die genannten Eigenschaften der CPC-Beobachtungsgrößen führen im Regelfall zu einer gewissen Konvergenzzeit, bis präzise Koordinaten erhalten werden können. Dieser Umstand bringt Nachteile für viele präzise GNSS-Anwendungen, die Positionsergebnisse innerhalb von wenigen Minuten erfordern.

2.5 Prozessierungsablauf

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Schritte für die Berechnung der Koordinaten aus den Galileo E5-Einfrequenz-Messungen beschrieben. Für die Berechnung der Positionen wird die Methode der relativen Positionierung verwendet, d.h. es werden Referenzstationen genutzt, um die präzisen Koordinaten eines neuen Punktes zu berechnen.

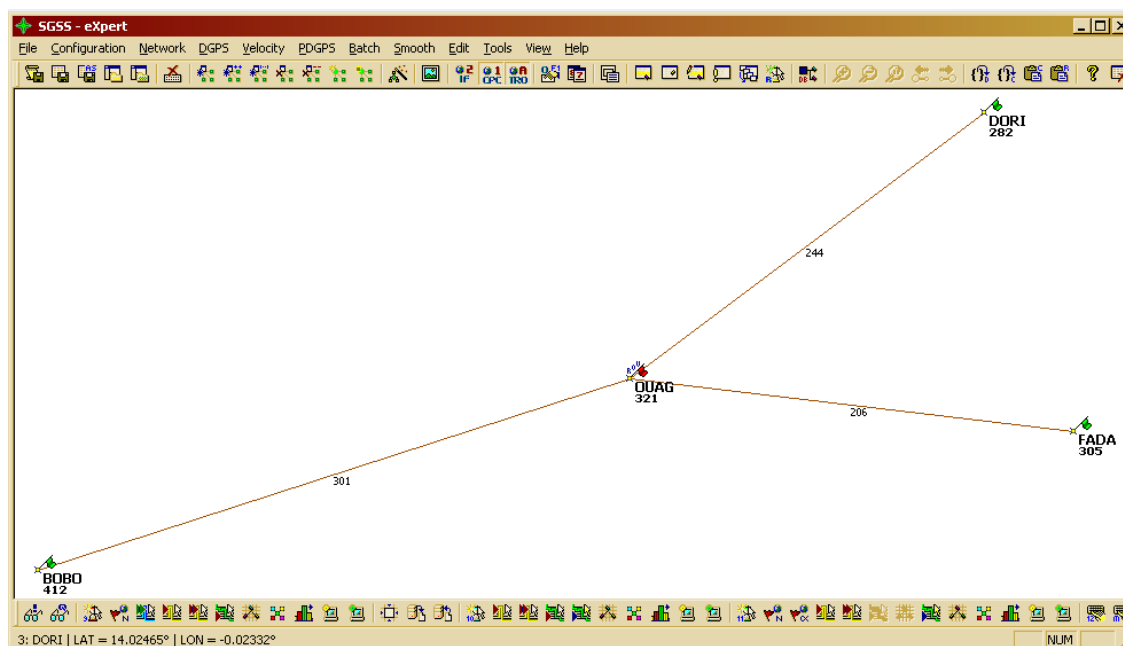


Abbildung 2-9: SGSS eXpert-Benutzeroberfläche

Die Prozessierung der Daten basiert auf der sogenannten „eXpert“-Applikation aus dem Softwarepaket SGSS²⁶, das während des SX5-Projektes an der Universität der Bundeswehr München entwickelt wurde. Das Softwarepaket besteht aus zwei Hauptteilen: der Expertenapplikation (eXpert) und der sogenannten „EasyScience“-Applikation. Hier wird ausschließlich mit der SGSS-„eXpert“ gearbeitet (siehe Abbildung 2-9). Die Applikation wurde für die Prozessierung von präzisen statischen, semi-kinematischen und kinematischen GNSS-Messungen implementiert.

²⁶ SGSS: „Scientific GNSS Support Service“ ist ein Softwarepaket, das während des EU 7. Framework SX5-Projektes entwickelt wurde. Das Projekt wurde vom Institut für Erdbeobachtung der Universität der Bundeswehr München koordiniert und in Zusammenarbeit mit anderen Partnern durchgeführt. Die Entwicklung der Software wurde von Dr. Ing SCHÜLER geleitet.

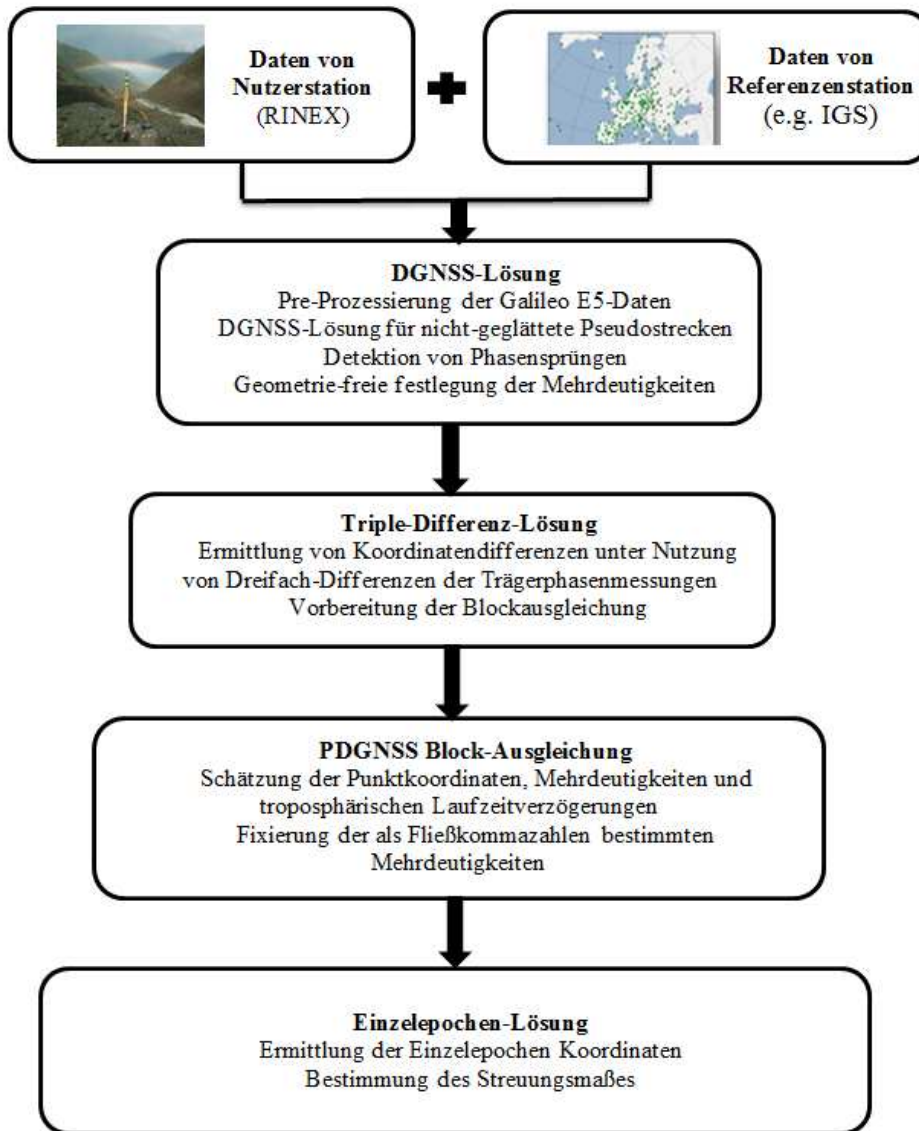


Abbildung 2-10: Prozessierungsschritte für die Galileo E5-CPC-Positionierungsmethode²⁷

Im Rahmen des SX5-Projekts wurde die Einfrequenz-Positionierungsfunktionalität in die Software eingebaut. Die Applikation bietet nun an, Einfrequenz-Positionierung entweder mit der Kombination von Code- und Trägerphasenmessungen oder nur mit Trägerphasenmessungen zu berechnen. Da diese Arbeit die Galileo-Einfrequenz-Positionierung behandelt, wird diese hier im Fokus stehen. Für die Prozessierung werden Standard-RINEX ²⁸ -Dateien zusammen mit präzisen SP3 ²⁹ -Orbitdateien

²⁷ DGNSS: "Differential GNSS"
PDGNSS: "Precise Differential GNSS"

²⁸ RINEX („Receiver Independent Exchange Format“) ist ein empfängerunabhängiges Daten-Speicher- und Austauschformat für GNSS-Rohdaten. Die erste Version wurde 1989 veröffentlicht. Die neueste Version 3.01 befindet sich seit 2009 in Anwendung und trägt den Herausforderungen durch neue Satellitensignale und Satellitensysteme (Galileo und Compass) Rechnung. Eine nähere Beschreibung findet sich bei IGS (<http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/rinex301.pdf>)

²⁹ SP3 („Standard Product 3“) ist ein Format zur Beschreibung von präzisen GNSS-Orbitprodukten. Weitere Informationen siehe http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/sp3_docu.txt.

benötigt (RINEX-Navigationsnachrichten können in das SP3-Format umgewandelt werden).

Eine Datenbank von verschiedenen Referenznetzwerken (EUREF-, ITRF- und lokale Stationen) ist in die Software integriert und kann direkt genutzt werden, um geeignete Referenzstationen zu wählen. Troposphärische Korrekturen aus verschiedenen Modellen (z.B. aus Wettermodellen oder TROPEX) können eingeführt werden. Die Datenanalyse wird durch verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten für die Koordinaten, die Residuen und andere Informationen unterstützt. Die Prozessierung ist in vier Hauptschritte aufgeteilt (siehe Abbildung 2-10): DGNSS-Lösung, zeitliche Inkrementation der Trägerphasenlösung, PDGNSS-Blockausgleichung und Einzelepochen-Lösung.

2.5.1 DGNSS-Lösung

Während dieses Prozessierungsschrittes wird eine differentielle Lösung der Codestreckenmessungen berechnet. Dabei spielt die Positionslösung nur eine Nebenrolle. Der eigentliche Zweck ist die Vorverarbeitung der Daten. Die Hauptaufgaben dieses Prozessierungsschrittes sind die Synchronisation der Messungen und die Quantifizierung der Atmosphärenfehler. Bei der Bildung der doppelten Differenzen kann es zu Synchronisationsproblemen kommen, da die Messungen sich auf die genau gleichen Epochen beziehen müssen. Bei modernen Empfängern spielt der Synchronisationsfehler aber immer weniger eine Rolle. Die Gleichung für die doppelt differenzierten Codestreckenmessungen kann wie folgt aufgestellt werden:

$$\begin{aligned}\nabla\Delta PR_{AB}^{ij} + v &= (PR_B^j - PR_A^j) + (PR_B^i - PR_A^i) + v \\ &= \nabla\Delta\rho_{AB}^{ij} + \delta\nabla\Delta PR_{AB}^{ij}\end{aligned}\quad (2-29)$$

Die doppelte Differenz bewirkt die Elimination von Satelliten- und Uhrenfehlern. Damit besteht der Vektor der unbekannt Parameter lediglich aus den drei Koordinatenkomponenten ($\underline{X} = (x_A, y_A, z_A)$). Zur Bildung der doppelten Differenzen können mehrere Referenzstationen genutzt werden.

Um die Parameter zu schätzen, wird die klassische Ausgleichung nach „vermittelnden Beobachtungen“ (das sog. GAUSS-MARKOV-Modell)³⁰ verwendet. Ausgehend von dem funktionalen Modell

$$\underline{l} + \underline{v} = \underline{A} \cdot \underline{\hat{x}} \quad (2-30)$$

und von dem stochastischen Modell

³⁰ Die Ausgleichung nach dem GAUSS-MARKOV-Modell ist ein linearer erwartungstreuer Schätzer, siehe NIEMEIER [2008], KAP 4.

$$\underline{\Sigma}_{ll} = \sigma_0^2 \cdot \underline{Q}_{ll} \quad (2-31)$$

können die unbekannt Parameter bestimmt werden. Zunächst werden angenäherte Parameter \underline{X}_0 genutzt, um den Vektor der genäherten Beobachtungen \underline{L}_0 zu bestimmen.

$$\underline{L}_0 = \underline{\varphi}(\underline{X}_0) \quad (2-32)$$

$\underline{\varphi}$: Funktionsvektor

Die Differenz der tatsächlichen Beobachtungen und der angenäherten Beobachtungen ergibt den Residuenvektor:

$$\underline{l} = \underline{L} - \underline{L}_0 \quad (2-33)$$

Die Aufstellung der Modellmatrix \underline{A} erfolgt durch die partielle Ableitung des Funktionsvektors an der Stelle \underline{X}_0 ³¹:

$$\underline{A} = \left(\frac{\partial \underline{\varphi}(\underline{X})}{\partial \underline{X}} \right)_0 = \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AB}^{1,2}}{\partial x_A} & \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AB}^{1,2}}{\partial y_A} & \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AB}^{1,2}}{\partial z_A} \\ \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AB}^{1,3}}{\partial x_A} & \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AB}^{1,3}}{\partial y_A} & \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AB}^{1,3}}{\partial z_A} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AC}^{1,2}}{\partial x_A} & \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AC}^{1,2}}{\partial y_A} & \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AC}^{1,2}}{\partial z_A} \\ \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AC}^{1,3}}{\partial x_A} & \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AC}^{1,3}}{\partial y_A} & \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AC}^{1,3}}{\partial z_A} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}_0 \quad (2-34)$$

Die stochastischen Eigenschaften des Modells lassen sich durch die Kovarianzmatrix beschreiben, die aus der Kofaktormatrix \underline{Q}_{ll} und der Varianz der Gewichtseinheit σ_0^2 zusammengesetzt wird. Letztlich ist die Wahl von σ_0 frei.

Damit wird die Gewichtsmatrix \underline{P} wie folgt abgeleitet:

$$\underline{Q}_{ll} = \frac{1}{\sigma_0^2} \cdot \underline{\Sigma}_{ll} \Rightarrow \underline{P} = \underline{Q}_{ll}^{-1} = \sigma_0^2 \cdot \underline{\Sigma}_{ll}^{-1} \quad (2-35)$$

Danach lässt sich die Kofaktormatrix der Unbekannten \underline{Q}_{xx} aus der Normalgleichungsmatrix \underline{N} berechnen:

³¹ Linearisierung durch Taylorentwicklung des Funktionsvektors mit Abbruch nach dem ersten Glied. Dies setzt eine lineare Beziehung zwischen Messgrößen und Parameter voraus und ist hier erfüllt.

$$\underline{Q}_{xx} = \underline{N}^{-1} = (\underline{A}^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{A})^{-1} \quad (2-36)$$

Schließlich können über die Schätzwerte \hat{x} für die Parameter die ausgeglichenen Unbekannten \underline{X} berechnet werden:

$$\hat{x} = (\underline{A}^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{A})^{-1} \cdot \underline{A}^T \cdot \underline{P} \cdot l \quad (2-37)$$

und

$$\underline{X} = \underline{X}_0 + \hat{x}$$

Die Kovarianzmatrix der ausgeglichenen Parameter ist ein Maß für die Genauigkeit und wird mit der folgenden Formel beschrieben:

$$\underline{\Sigma}_{xx} = \sigma_0^2 \cdot \underline{Q}_{xx} \quad (2-38)$$

Dieses Genauigkeitsmaß basiert auf dem A-priori-Wert der Varianz der Gewichtseinheit σ_0^2 . Es kann auch empirisch ein Maß für die Genauigkeit ermittelt werden. Dafür werden ausgehend von den Verbesserungen

$$v = \underline{A} \cdot \hat{x} - l \quad (2-39)$$

die empirische Varianz der Gewichtseinheit a posteriori berechnet:

$$s_0^2 = \frac{1}{n - u} \cdot v^T \cdot \underline{P} \cdot v \quad (2-40)$$

n bezeichnet die Anzahl der Beobachtungen und u die Anzahl der unbekannt Parameter. Die Differenz dieser beiden Größen ergibt die Anzahl der statistischen Freiheitsgrade.

Letztlich ergibt die Kovarianz der Unbekannten folgendes:

$$\underline{S}_{xx} = s_0^2 \cdot \underline{Q}_{xx} \quad (2-41)$$

Werden ungeglättete Galileo E5-Codestreckenmessungen als Beobachtungen verwendet, so wird eine Positionsgenauigkeit der DGNSS-Lösung im Bereich 1 bis 2 m erwartet.

2.5.2 Zeitliche Inkrementation der Trägerphasenlösung (Triple-Differenz-Lösung)

Bei der zeitlichen Inkrementation der Trägerphasenlösung wird eine Schätzung von Positionsinkrementen anhand einer relativen Trägerphasenlösung realisiert. Die

relative Trägerphasenlösung wird mit dreifachen Differenzen berechnet. Hiermit handelt es sich um eine zeitlich-relative Methode, die die räumlich-relative Eigenschaft der doppelten Differenzen ergänzt. Dabei werden die Positionsdifferenzen relativ zur vorausgegangenen Messepoche berechnet.

Der Zweck dieses Schrittes ist u.a. die Datenvorbereitung für die Blockausgleichung und die Detektion von Änderungen in den Datensätzen, vor allem aber die Schätzung der Fließkommazahlen (engl. „Float“) der unbekanntenen Mehrdeutigkeit. Im eigentlichen Sinn erfolgt hier keine vollwertige Punktbestimmung.

$$\delta \nabla \Delta \Phi_{AB,k-1,k}^{ij} + v = (\nabla \Delta \rho_{AB,k}^{ij} - \nabla \Delta \rho_{AB,k}^{ij}) + (\nabla \Delta \delta \Phi_{AB,k}^{ij} - \nabla \Delta \delta \Phi_{AB,k-1}^{ij}) \quad (2-42)$$

Die Positionsvektoren des Galileo Einfrequenz-Empfängers zu den Epochen $k-1$ und k werden wie folgt angegeben:

$$\underline{X}_{A,k-1}^* = (\underline{X}_{A,k-1} + \delta \underline{X}_{A,k-1}) \quad (2-43)$$

^

$$\underline{X}_{A,k}^* = (\underline{X}_{A,k} + \delta \underline{X}_{A,k})$$

Die hier zu schätzende Größe ist die Positionsdifferenz zwischen beiden Epochen. Sie wird mit

$$\Delta \underline{X}_{A,k-1,k} = (\underline{X}_{A,k} + \delta \underline{X}_{A,k}) - (\underline{X}_{A,k-1} + \delta \underline{X}_{A,k-1}) \quad (2-44)$$

berechnet. Damit kann der unbekannte Positionsvektor aufgestellt werden:

$$\underline{X} = [\Delta x_{A,k-1,k}, \Delta y_{A,k-1,k}, \Delta z_{A,k-1,k}] \quad (2-45)$$

Es ist zu anmerken, dass die Koordinaten der Epoche $k-1$ aus der DGNSS-Lösung entnommen werden. Nun können die unbekanntenen Positionsparameter anhand der vermittelnden Ausgleichung bestimmt werden. Die zugehörige Modellmatrix wird durch partielle Ableitung des funktionalen Modells nach den unbekanntenen Parametern aufgestellt.

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla \Delta \Phi_{AB,k-1,k}^{1,2}}{\partial \Delta x_{A,k-1,k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \Phi_{AB,k-1,k}^{1,2}}{\partial \Delta y_{A,k-1,k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \Phi_{AB,k-1,k}^{1,2}}{\partial \Delta z_{A,k-1,k}} \\ \frac{\partial \nabla \Delta \Phi_{AB,k-1,k}^{1,3}}{\partial \Delta x_{A,k-1,k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \Phi_{AB,k-1,k}^{1,3}}{\partial \Delta y_{A,k-1,k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \Phi_{AB,k-1,k}^{1,3}}{\partial \Delta z_{A,k-1,k}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \nabla \Delta \Phi_{AC,k-1,k}^{1,2}}{\partial \Delta x_{A,k-1,k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \Phi_{AC,k-1,k}^{1,2}}{\partial \Delta y_{A,k-1,k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \Phi_{AC,k-1,k}^{1,2}}{\partial \Delta z_{A,k-1,k}} \\ \frac{\partial \nabla \Delta \Phi_{AC,k-1,k}^{1,3}}{\partial \Delta x_{A,k-1,k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \Phi_{AC,k-1,k}^{1,3}}{\partial \Delta y_{A,k-1,k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \Phi_{AC,k-1,k}^{1,3}}{\partial \Delta z_{A,k-1,k}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (2-46)$$

Der Rest der Berechnung verläuft nach dem bekannten Formelapparat des „Gauß-Markov“-Ausgleichungsmodells (siehe 2.5.2).

2.5.3 PDGNSS-Blockausgleichung der CPC-Lösung

Die Blockausgleichung ist der Hauptteil der CPC-Prozessierung der Galileo E5-Einfrequenz-Daten. In diesem Schritt werden die Galileo E5-CPC-Beobachtungsgrößen mit einer bestimmten zeitlichen Auflösung (meistens reduziert im Vergleich zu den vorangegangenen Schritten) in einem Block ausgeglichen. Danach können die zuvor als Fließkommazahlen bestimmten Mehrdeutigkeiten fixiert werden. Durch Bildung doppelter Differenzen aus den CPC-Beobachtungen wird die Anzahl der unbekannt Parameter auf ein Minimum reduziert. Die Gleichung ergibt:

$$\nabla \Delta CPC_{A,B}^{ij} + v = \frac{\nabla \Delta PR_{AB}^{ij} + \nabla \Delta \Phi_{AB}^{ij}}{2} = \nabla \Delta \rho_{A,B,CPC}^{ij} - \frac{\lambda}{2} \cdot \nabla \Delta N_{AB}^{ij} + \nabla \Delta \delta CPC_{A,B}^{ij} \quad (2-47)$$

Wahlweise können sogenannte Koordinaten-„Constraints“ in den Beobachtungsvektor eingefügt werden. Die „Constraints“ sind a priori bekannte Koordinaten, die die Ausgleichung vereinfachen können. Sie werden z.B. aus der DGNSS-Lösung gewonnen.

$$\underline{L} = \begin{bmatrix} \left[\nabla \Delta CPC_{A,B,k}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,B,k}^{1,3} \dots \nabla \Delta CPC_{A,C,k}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,C,k}^{1,3} \dots \right]^T \\ \left[\nabla \Delta CPC_{A,B,k+1}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,B,k+1}^{1,3} \dots \nabla \Delta CPC_{A,C,k+1}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,C,k+1}^{1,3} \dots \right]^T \\ \vdots \\ \left[x_k, y_k, z_k, x_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1} \dots \right]^T \end{bmatrix} \quad (2-48)$$

Der Parametervektor fasst die Positionen zu den verschiedenen Zeitpunkten, die einzelnen Mehrdeutigkeiten und die residualen troposphärischen Laufzeitverzögerungen in Zenitrichtung zusammen. Es können weitere Zusatzparameter (Multipath, relativistische Effekte etc.) hinzukommen. Diese Parameter werden in Kapitel 3 eingehend behandelt.

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} [x_k, y_k, z_k, x_{k+1}]^T \\ [x_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1}]^T \\ \vdots \\ [\nabla\Delta N_{AB,CPC}^{1,2}, \nabla\Delta N_{AB,CPC}^{1,3}]^T \\ [\nabla\Delta N_{AC,CPC}^{1,2}, \nabla\Delta N_{AC,CPC}^{1,3}]^T \\ \vdots \\ ZRD_A^{z=0} \end{bmatrix} \quad (2-49)$$

Bei der Blockausgleichung erfolgt zuerst die Unterteilung der Modellmatrix A in insgesamt sechs Submatrizen:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{11} & \underline{A}_{12} & \underline{A}_{13} \\ \underline{A}_{21} & \underline{A}_{22} & \underline{A}_{23} \end{bmatrix} \quad (2-50)$$

Die Submatrix \underline{A}_{11} besteht aus den partiellen Ableitungen der doppelten Differenzen nach den Koordinaten, \underline{A}_{12} aus den partiellen Ableitungen der CPC-Beobachtungen nach den Mehrdeutigkeiten und \underline{A}_{13} aus den partiellen Ableitungen derselben Beobachtungen nach dem troposphärischen Parameter.

$$\underline{A}_{11} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla \Delta CPC_{AB}^{1,2}}{\partial x_{A,k}} & \dots \\ \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (2-51)$$

$$\underline{A}_{12} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla \Delta CPC_{AB}^{1,2}}{\partial \nabla \Delta N_{AB,CPC}^{1,2}} & \dots \\ \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (2-52)$$

$$\underline{A}_{13} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla \Delta CPC_{AB}^{1,2}}{\partial ZRD_A^{z=0}} & \dots \\ \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (2-53)$$

Wenn die Positionsparameter des „Rovers“³² als Beobachtungs-„Constraints“ eingeführt werden, bestehen die Submatrizen \underline{A}_{21} , \underline{A}_{22} und \underline{A}_{23} aus den partiellen Ableitungen der „Constraints“ nach den Koordinaten, der Mehrdeutigkeit und den Troposphärenparametern. Da die „Constraints“ als Koordinaten des „Rovers“ behandelt werden, handelt es sich um konstante Werte. Somit ergibt die Submatrix \underline{A}_{21} eine Einheitsmatrix.

³² Ein Rover ist ein Empfänger (z. B. ein GPS-Empfänger), die Daten aus einem entfernten Referenzstation sammelt.

$$\underline{A}_{21} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{A,k}}{\partial x_{A,k}} & \cdots \\ \vdots & \ddots \end{bmatrix} = \underline{E} \quad (2-54)$$

Da keine direkte Verbindung zwischen den Komponenten der Position und den Mehrdeutigkeits- und Troposphärenparametern besteht, ergeben die Submatrizen \underline{A}_{22} und \underline{A}_{23} Nullmatrizen.

$$\underline{A}_{22} = \underline{0} \quad (2-55)$$

$$\underline{A}_{23} = \underline{0}$$

Somit lässt sich die Modellmatrix folgendermaßen beschreiben:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{11} & \underline{A}_{12} & \underline{A}_{13} \\ \underline{A}_{21} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-56)$$

Durch die Eliminierung einiger Elemente wird der Rechenaufwand reduziert. Nun kann das vermittelnde Ausgleichungsverfahren angewendet werden, um die Parameter zu bestimmen. Zuerst wird die Positionslösung mit der Fließkommalaösung (sog. „Float-Solution“) der Mehrdeutigkeiten berechnet. Daraus resultiert jedoch eine lange Konvergenzzeit der Parameter. Die Fixierung der Mehrdeutigkeiten auf ihre ganzzahligen Werte trägt zur Reduzierung dieser Konvergenzzeit bei. Dies erfordert eine Wiederholung der Blockausgleichung mit den fixierten Mehrdeutigkeiten. Dadurch werden alle erfolgreich festgesetzten Mehrdeutigkeiten aus dem Parametervektor eliminiert. Im Fall einer kompletten Fixierung der Mehrdeutigkeiten (Idealfall) werden die Submatrizen \underline{A}_{12} und \underline{A}_{22} für die Modellmatrix irrelevant und können somit gestrichen werden. Aufgrund der Eigenschaften des Galileo E5-Signals ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass eine komplette Fixierung der Mehrdeutigkeit erreicht werden kann.

2.5.4 PDGNSS-Einzelepochen-Lösung der CPC-Beobachtungen

Dieser Schritt wird vorgenommen, um die Positionierungsergebnisse Epoche für Epoche zu bestimmen. In den meisten Fällen wird die Blockausgleichung mit reduzierter zeitlicher Auflösung der Beobachtungen ausgeführt, um einen rechenintensiven Schritt zu vermeiden. Nunmehr soll eine hochauflösende Positionslösung berechnet werden. Der unbekannte Parametervektor ist in dieser Prozessierungsphase lediglich noch auf die Koordinaten der Position reduziert. Die zusätzliche Schätzung der verbleibenden troposphärischen Laufzeitverzögerung ist hier nicht mehr erforderlich, da diese Größe über längere Zeitintervalle geglättet wird. Somit lässt sich die Modellmatrix wie folgt darstellen:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla \Delta \text{CPC}_{AB,k}^{1,2}}{\partial \Delta x_{A,k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \text{CPC}_{AB,k}^{1,2}}{\partial \Delta y_{A,k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \text{CPC}_{AB,k}^{1,2}}{\partial \Delta z_{A,k}} \\ \frac{\partial \nabla \Delta \text{CPC}_{AB,k}^{1,3}}{\partial \Delta x_{A,k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \text{CPC}_{AB,k}^{1,3}}{\partial \Delta y_{A,k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \text{CPC}_{AB,k}^{1,3}}{\partial \Delta z_{A,k}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \nabla \Delta \text{CPC}_{AC,k}^{1,2}}{\partial \Delta x_{A,k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \text{CPC}_{AC,k}^{1,2}}{\partial \Delta y_{A,k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \text{CPC}_{AC,k}^{1,2}}{\partial \Delta z_{A,k}} \\ \frac{\partial \nabla \Delta \text{CPC}_{AC,k}^{1,3}}{\partial \Delta x_{A,k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \text{CPC}_{AC,k}^{1,3}}{\partial \Delta y_{A,k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \text{CPC}_{AC,k}^{1,3}}{\partial \Delta z_{A,k}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (2-57)$$

Bei einer Erhöhung der zeitlichen Auflösung in dieser Phase ist ein hoher Rechenaufwand zu erwarten. Die Rechengeschwindigkeit kann jedoch durch die Ausgleichung jeweils kürzerer Epoche deutlich erhöht werden.

2.6 „Rapid Convergence Filter“-Ansatz

Die Implementierung des „Rapid Convergence Filter (RCF)“-Ansatzes ermöglicht es einem Galileo E5-Einfrequenz-Empfänger, innerhalb weniger Minuten präzise Positionsergebnisse zu liefern. Die Methode basiert auf einer sequentiellen Schätzung der unbekannt Parameter über einen Kalman-Filter. Der sequentielle Filter hat primär die Funktion, die Mehrdeutigkeit so schnell wie möglich zu lösen und somit die Konvergenzzeit der Positionsparameter signifikant zu reduzieren. Hierbei wird der „All-Inclusive Sequential Ambiguity Estimator (ANSA)“-Filter verwendet, der in Kapitel 5.2.5 bei SCHÜLER E. [2008] detaillierter beschrieben wird. Als Beobachtungen werden Codestrecken- und Trägerphasenmessungen parallel in Form von doppelten Differenzen prozessiert, um die Ergebnisparameter, d.h. primär die Position der „Rover“-Station, die Mehrdeutigkeit und die Störparameter, wie beispielsweise Ionosphären- und Troposphärenfehler, zu schätzen. Daher wird die Methode auch „Code and Carrier (CAC)“-Prozessierung genannt. Damit unterscheidet sich die Methode in jeder Hinsicht von der „traditionellen“ CPC-Einfrequenz-Positionierungs-Methode.

SCHÜLER [2006] beschreibt die Grundgleichung des ANSA-Filters als eine stochastische Differentialgleichung mit der Voraussetzung, dass der behandelte Prozess stationär und ergodisch³³ ist. Um den Filterungsprozess zu vereinfachen, wird angenommen, dass die zeitlich aufeinanderfolgenden Werte nicht korreliert sind. Somit handelt es sich bei den Rauschprozessen um „weißes Rauschen“. Das zu filternde System ist linear und zeitlich veränderlich. Im Fall der Einfrequenz-Positionierung wird von einer statischen Beobachtungsmethode ausgegangen, die Störfaktoren ändern sich jedoch zumeist mit der Zeit.

³³ Bei einem stationären Zufallsprozess stimmen alle statistischen Kenngrößen der Zufallsgrößen überein. Auch zu jedem anderen Zeitpunkt ergeben sich genau gleiche Werte. Eine wichtige Unterklasse der stationären Zufallsprozesse sind die so genannten ergodischen Prozesse.
Source: http://www.Intwww.de/downloads/Stochastische%20Signaltheorie/Theorie/Kapitel4/ Sto_Kap4.4.pdf; letzter Aufruf 17.12.2012.

Die Methode verspricht eine schnelle Lösung der Mehrdeutigkeitsterme nur dann, wenn die Codestreckenmessungen genügend genau (im Zentimeter-Bereich) sind und eine gute Satelliten-Sichtbarkeit garantiert ist. Bei Galileo E5-Codestreckenmessungen liegt die Genauigkeit bei wenigen Zentimetern, somit stellt hier die Genauigkeitsanforderung kein Problem dar.

Der „Rapid Convergence Filter (RCF)“ führt zwei wichtige Schritte durch:

- Zuerst werden der Zustand der Station (d.h. die Koordinaten) und die Störparameter (atmosphärische Laufzeitverzögerungen, Mehrdeutigkeit etc.) geschätzt.
- Anschließend erfolgen die Prädiktion der Aufdatierung und die Korrekturen der Aufdatierung. Dies stellt die eigentliche Filterung dar, die in der optimalen Zusammenführung der Beobachtungen und des prädizierten Zustandsvektors zur vorherigen Epoche entsteht.

Die Filterung setzt die Kenntnis des Ausgangszustands zur Nullepoche voraus, d.h. zur Prädiktion werden Startwerte und die zugehörigen Kovarianzmatrizen benötigt.

2.6.1 Die Filterungsschritte

Der RCF ermöglicht die Schätzung aller Parameter für die präzise Einfrequenz-Positionierung ohne Bildung einer Signal- oder Frequenzkombination. Zur Epoche k besteht der Beobachtungsvektor L aus den doppelten differenzierten Codestrecken- und Trägerphasenmessungen. Die ionosphärischen und die troposphärischen Laufzeitverzögerungen werden als „Constraints“ eingeführt und sollen den zum Zeitpunkt der Messungen herrschenden Zustand der Atmosphäre bestmöglich beschreiben:

$$\underline{L}_k = \begin{pmatrix} \nabla\Delta PR_{AB}^{ij} \\ \nabla\Delta PR_{AB}^{ik} \\ \vdots \\ \nabla\Delta\phi_{AB}^{ij} \\ \nabla\Delta\phi_{AB}^{ik} \\ \vdots \\ ZRD_A \\ \nabla\Delta ION_{AB}^{ij} \end{pmatrix} \quad (2-58)$$

- L : Beobachtungsvektor
 $\nabla\Delta PR_{AB}^{ij}$: Pseudostreckenmessungen
 $\nabla\Delta\phi_{AB}^{ij}$: Trägerphasenmessungen
 ZRD_A : Troposphärenfehler (Zenith Residual Delay)
 $\nabla\Delta ION_{AB}^{ij}$: Ionosphärenfehler

Die Werte für den Troposphären- und den Ionosphärenfehler können aus herkömmlichen Modellen (z.B. TROPEX-Modell bzw. IONEX-Maps) entnommen werden. Der Vektor der Unbekannten, auch als Zustandsvektor bekannt, wird wie folgt ausgedrückt:

$$\underline{X}_k = \begin{pmatrix} (x_A \ y_A \ z_A)^T \\ (\nabla\Delta N_{AB E5}^{ij} \ \nabla\Delta N_{AB E5}^{ik} \ \dots)^T \\ ZRD_A \\ (\nabla\Delta ION_{AB E5}^{ij} \ \nabla\Delta ION_{AB E5}^{ik} \ \dots)^T \end{pmatrix} \quad (2-59)$$

X State vector

ZRD : Zenith Residual Delay

Er besteht aus:

- dem unbekanntem Positionsvektor der „Rover“-Station A. Die Koordinaten der Referenzstation B sind a priori bekannt und werden festgesetzt.
- den Mehrdeutigkeitstermen der Galileo E5-Trägerphasenmessungen für jeden empfangenen Satelliten. Im Prinzip sind diese Terme von primärem Interesse im Filterungsprozess und müssen somit geschätzt werden.
- der residualen troposphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung: Die azimuthalen Variationen werden hier vernachlässigt. Die Korrektur der troposphärischen Laufzeitverzögerung ist stationsspezifisch bei der RCF-Methode, d.h. die ZRD („Zenith Residual Delay“) wird für die „Rover“-Station geschätzt. Dadurch wird die Anzahl der Parameter reduziert.
- der doppelten differenzierten residualen ionosphärischen Laufzeitverzögerung: Die ionosphärische Laufzeitverzögerung kann auch als eine stationsspezifische zeitveränderliche Funktion geschätzt werden, wofür jedoch externe Hilfsmethoden benötigt werden, um eine schnelle Konvergenz der Positionsparameter zu erreichen. Die externe Hilfe kann aus IONEX-Karten³⁴ oder aktiven GNSS-Netzwerken wie SAPOS³⁵ kommen. Allgemein werden die atmosphärischen Laufzeitverzögerungen für ein lokales Netzwerk, bei dem die Basislinien nicht lang sind (kürzer als 10 km), durch die Bildung von doppelten Differenzen wesentlich reduziert. Somit kann auf externe Hilfsmodelle verzichtet werden.

Die Modellmatrix \underline{A}_k ergibt dann

³⁴ IONEX Karten: Es handelt sich um TEC-Karten, die in zwei Arten („Final TEC Maps und Rapid TEC Maps“) im IONEX-Format geliefert werden: <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/data/format/ionex1.pdf>; letzter Aufruf 12.12.2012

³⁵ Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) stellt Korrekturdaten zur Verfügung, mit denen in Deutschland eine genauere GNSS-Positionsbestimmung möglich ist.

$$\underline{A}_k = \frac{\partial \underline{L}_k}{\partial \underline{X}_k} \quad (2-60)$$

Eine Einteilung nach Zweckmäßigkeit in Blockmatrizen von \underline{A}_k ermöglicht die Eliminierung einiger Parameter. Somit lässt sich die Modellmatrix wie folgt beschreiben:

$$\underline{A}_k = [\underline{A}_{11,k}, \underline{A}_{12,k}, \underline{A}_{13,k}, \underline{A}_{14,k}]_k \quad (2-61)$$

- $\underline{A}_{11,k}$: Submatrix der partiellen Ableitungen der Strecken und Trägerphasen nach den Positionen
- $\underline{A}_{12,k}$: Submatrix der partiellen Ableitung der Trägerphasen nach den Mehrdeutigkeiten
- $\underline{A}_{13,k}$: Submatrix der partiellen Ableitungen der Strecken und Trägerphasen nach der residualen troposphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung
- $\underline{A}_{14,k}$: Submatrix der partiellen Ableitungen der Strecken und Trägerphasen nach der doppelten differenzierten residualen ionosphärischen Laufzeitverzögerung

Die ionosphärischen und troposphärischen Laufzeitverzögerungen werden aus Modellen geschätzt und können als bekannte Werte in den Beobachtungsvektor eingeführt werden. Damit ergeben ihre partiellen Ableitungen konstante Werte. Die Submatrizen werden in folgenden Formeln beschrieben:

$$\underline{A}_{11,k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AB}^{1,2}}{\partial x_A} & \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AB}^{1,2}}{\partial y_A} & \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AB}^{1,2}}{\partial z_A} \\ \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AB}^{1,3}}{\partial x_A} & \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AB}^{1,3}}{\partial y_A} & \frac{\partial \nabla \Delta PR_{AB}^{1,3}}{\partial z_A} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB}^{1,2}}{\partial x_A} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB}^{1,2}}{\partial y_A} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB}^{1,2}}{\partial z_A} \\ \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB}^{1,2}}{\partial x_A} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB}^{1,2}}{\partial y_A} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB}^{1,2}}{\partial z_A} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}_k \quad (2-62)$$

$$\underline{A}_{12,k} = \begin{bmatrix} \vdots & \dots \\ \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB}^{1,2}}{\partial \nabla \Delta N_{AB}^{ij}} & \dots \\ \vdots & \ddots \end{bmatrix}_k \quad (2-63)$$

$$\underline{A}_{13,k} = \begin{bmatrix} \vdots & \dots \\ 1 & \dots \\ \vdots & \ddots \end{bmatrix}_k \quad (2-64)$$

$$\underline{A}_{14,k} = \begin{bmatrix} \vdots & & \\ 1 & \cdots & \\ \vdots & \ddots & \\ & & \end{bmatrix}_k \quad (2-65)$$

Alle Zustände werden als „Random Walk“-Prozesse modelliert³⁶. Somit lässt sich die Transitionsmatrix zur Epoche k als Einheitsmatrix ableiten:

$$\underline{T}_k = \underline{E}_{n,n} \quad (2-66)$$

Der Zustandsvektor zur aktuellen Epoche k wird dann aus dem Unbekanntenvektor der zurückliegenden Epoche $k-1$ prädiziert:

$$\underline{X}_k^P = \underline{T} \cdot \underline{X}_{k-1} \quad (2-67)$$

Die angenommene zeitliche Parameter-Variation wird durch eine Erhöhung des Varianzniveaus des Filters ermittelt. Dies geschieht in der Systemrauschmatrix $\underline{\Sigma}_{SS}$. Für den Fall eines integrierten Rauschmodells besteht die Systemrauschmatrix aus den folgenden Submatrizen:

$$\underline{\Sigma}_{SS} = \begin{bmatrix} \underline{\Sigma}_{SS,XYZ} \\ \underline{\Sigma}_{SS,N} \\ \underline{\Sigma}_{SS,ZRD} \\ \underline{\Sigma}_{SS,ION} \end{bmatrix} \quad (2-68)$$

Die Kovarianzmatrix des Zustandsvektors wird durch die Anwendung des Kovarianz-Fortpflanzungsgesetzes berechnet als:

$$\underline{\Sigma}_{XX_k} = \underline{T} \underline{\Sigma}_{XX_{k-1}}^* \underline{T}^T + \underline{\Sigma}_{SS} = \underline{\Sigma}_{XX_{k-1}}^* + \underline{\Sigma}_{SS} \quad (2-69)$$

$\underline{\Sigma}_{XX}$: Kovarianzmatrix des prädizierten Zustandsvektor (Epoche k)

$\underline{\Sigma}_{XX}^*$: Aufdatierte Kovarianzmatrix des Zustandsvektor (Epoche $k-1$)

$\underline{\Sigma}_{SS}$: Systemrauschmatrix, hier eine Diagonalmatrix

T : Transitionsmatrix

Das Prozessrauschen lässt sich in Abhängigkeit von den Parametern in verschiedene Gruppen unterteilen. So ergeben die einzelnen Varianzen der Systemrauschmatrix:

- das Prozessrauschen der Positionen $q_{x,y,z}$
- das Prozessrauschen der Mehrdeutigkeiten q_N
- das Prozessrauschen der Troposphäre in Zenitrichtung q_{ZRD} und

³⁶ siehe SCHÜLER [2009]

- das Prozessrauschen der doppelt differenzierten Ionosphäre in Satellitenrichtung q_{ION}

Damit können die Varianzen der Kovarianzmatrix bestimmt werden und man erhält z.B. für die Koordinaten die folgende Gleichung:

$$\sigma_{x,y,z}^2 = q_{x,y,z}^2 \cdot \Delta t \quad (2-70)$$

$q_{x,y,z}$ wird in mm/\sqrt{h} ausgedrückt.

Es wird ersichtlich, dass diese Einteilung eine flexiblere Auswahl der Prozessrauschkoeffizienten erlaubt, um auf verschiedene Situationen reagieren zu können. Damit sollten im Fall einer Einfrequenz-Positionierung mit Galileo E5-Daten die folgenden Voraussetzungen gegeben sein, um schnell präzise Koordinaten erhalten zu können: Die Messstation muss statisch sein. $q_{x,y,z}$ wird nahe dem Wert null gewählt, somit konvergiert der Filter schneller und die Varianz der Koordinatenparameter nimmt mit der Zeit rasch ab, da die Beobachtungen im Lauf der Zeit ein hohes Gewicht bekommen. Die zeitliche Variation der Atmosphärenzustände sollte entsprechend mitgeschätzt werden. Da sich die Troposphäre in Zenitrichtung über eine Beobachtungszeit von ca. 1 h hinweg in der Regel nur unwesentlich verändert, kann q_{ZPD} hier mit $1 \text{ cm}/\sqrt{h}$ angegeben werden. Eine Schätzung der Ionosphärenvariation ist jedoch ein wenig schwieriger, da hier zusätzlich eine Elevationsabhängigkeit besteht sowie unter ungünstigen Bedingungen (z.B. bei starken ionosphärischen Aktivitäten) stärkere Variationen auftreten können. Somit sollte ein Wert für q_{ION} mindestens so groß wie q_{ZPD} gewählt werden, im Zweifelsfall sogar etwas höher.

Der Differenzvektor zwischen den tatsächlichen und den prädierten Beobachtungen, auch „Vektor der Innovationen“ genannt, kann nun ermittelt werden:

$$\Delta \underline{L}_k = \underline{L}_k - \underline{A}_k \cdot \underline{X}_k^P \quad (2-71)$$

Die dazugehörige Kovarianzmatrix wird folgendermaßen formuliert:

$$\underline{\Sigma}_{\Delta \Delta L, k} = \underline{\Sigma}_{LL} + \underline{A}_k \cdot \underline{\Sigma}_{XX, k}^P \cdot \underline{A}_k^P \quad (2-72)$$

Daraus lässt sich die sogenannte „Verstärkungsmatrix“ berechnen:

$$\underline{K}_{,k} = \underline{\Sigma}_{XX, k}^P \cdot \underline{A}_k^T \cdot \underline{\Sigma}_{\Delta \Delta L, k}^{-1} \quad (2-73)$$

Nun folgt die Aufdatierung des Zustandsvektors

$$\underline{X}_k = \underline{X}_k^P + \underline{K}_k \cdot \Delta \underline{L}_k \quad (2-74)$$

und die Kovarianzmatrix der Parameter ergibt:

$$\underline{\Sigma}_{xx,k} = \underline{\Sigma}_{xx,k}^P + \underline{K}_k \cdot \underline{\Sigma}_{\Delta I \Delta I,k} \cdot \underline{K}_k^T \quad (2-75)$$

Der durchgeführte Filterungsprozess ermöglicht es durch die Schätzung der Parameter die Konvergenzzeit der präzisen Koordinaten wesentlich zu verkürzen. Es wird angenommen, dass man Koordinaten im Dezimeter-Bereich schon nach wenigen Beobachtungsepochen (ca. 30s) erhalten kann.

2.6.2 Initialisierung des Filters

Die Initialisierung des Filters ist der wichtigste Prozessierungsschritt bei der RCF-Methode. Dabei wird der Zustandsvektor \underline{x} und damit auch die Kovarianzmatrix $\underline{\Sigma}_{xx}$ vor der Filterung mit Näherungswerten belegt. Die Näherungswerte für die Koordinaten können aus der Berechnung der Pseudostrecken-DGNSS-Lösungen gewonnen werden. Durch die Kombination von Codestrecken- und Trägerphasenmessung können approximative Mehrdeutigkeitswerte geschätzt werden. Abschließend werden die residualen Laufzeitverzögerungen der Atmosphäre mit Werten aus bestehenden Modellen (beispielsweise TROPEX-Modell bzw. IONEX-Maps) eingesetzt.

Für die Bildung der Kovarianzmatrix wird vorausgesetzt, dass Standardabweichungen aus den Näherungswerten der Koordinaten gewonnen werden können. Die Standardabweichung der Mehrdeutigkeiten soll hoch angesetzt werden. Ein typischer Wert bei der Initialisierung sind ± 99 Zyklen. Erfahrungsgemäß ermöglicht dieser Wert durch die Wirkung der Code-Pseudostreckenmessungen eine schnelle Konvergenz des Filters nach der Filteraufdatierung. Da bei dem Beobachtungsvektor die atmosphärischen Laufzeitverzögerungen als „Constraints“ (zusätzliche Parameter) eingeführt werden, lassen sich die Standardabweichungen für die Ionosphären- und Troposphärenfehler frei wählen. Die Standardabweichungen dieser Pseudobeobachtungen („Constraints“) sind unabhängig von der Initialisierung des Zustandsvektors individuell vom Nutzer definierbar, ihre Größenordnungen orientieren sich jedoch zumeist an bekannten Werten aus herkömmlichen atmosphärischen Modellen.

2.7 Mehrdeutigkeitslösung der CPC-Beobachtung

Nach Bildung der CPC-Kombination bleibt der Mehrdeutigkeitsterm weiterhin erhalten, wobei dieser nur noch die Hälfte der ursprünglichen Trägerphasenmehrdeutigkeit beträgt (siehe Gleichung 2-24). Um mit den Galileo E5-Einfrequenz-Daten die höchste Positionierungsgenauigkeit zu erreichen, muss der ganzzahlige Mehrdeutigkeitsterm der neuen CPC-Beobachtungsgröße festgesetzt werden. Die Präsenz des Mehrdeutigkeitsterms erhöht die Konvergenzzeit der CPC-Positionsparameter. Eine Lösung der Mehrdeutigkeiten ermöglicht den Erhalt von präzisen Koordinaten in kurzer Zeit. Die Ermittlung der ganzzahligen (Integer-) Werte der Mehrdeutigkeitsparameter wird als Mehrdeutigkeitsfixierung (engl. „Ambiguity Fixing“) bezeichnet. Die Berechnung der mehrdeutigkeitsfixierten Positionslösung wird nach TEUNISSEN [1993] in drei Schritten vollzogen:

- Als Erstes werden sogenannte Fließkommazahlen der Mehrdeutigkeit mit Hilfe der „Methode des kleinsten Quadrats“ geschätzt. Die geschätzten Werte dieser Fließkommazahlen werden während der zeitlichen Inkrementation der Trägerphasenlösung berechnet. Im Fall einer statischen Einfrequenz-Positionierung über einen langen Beobachtungszeitraum hinweg (ca. 6h) reichen diese Werte aus.
- Danach wird die Fließkommazahl den Mehrdeutigkeiten angepasst, was die Schätzung der ganzzahligen (Integer-)Mehrdeutigkeit erleichtern soll.
- Schließlich werden die Fließkommazahl und die übrigen Parameter (insbesondere die unbekannte Position und möglicherweise zusätzliche Parameter wie die atmosphärischen Verzögerungen) aufgrund ihrer Korrelation mit den Mehrdeutigkeiten korrigiert. Die endgültige Lösung mit den ganzzahligen Mehrdeutigkeitstermen wird als „fixierte Lösung“ bezeichnet und dürfte es im Fall einer Galileo E5-Einfrequenzpositionierung erlauben, innerhalb von wenigen Minuten Koordinaten im cm-Bereich zu erzielen.

Die Suche nach den richtigen Mehrdeutigkeiten kann entweder im Positionsraum (auch als „Ambiguity-Function-Method“ bekannt, siehe REMONDI [1984], MADAR [1991]) oder im Beobachtungsraum durchgeführt werden. Aufgrund der hohen Rechenzeiten ist mit der Suche im Positionsraum eine schnelle Mehrdeutigkeitslösung kaum realisierbar. Aus diesem Grund wird die Suche im Beobachtungsraum häufiger angewandt. In dieser Arbeit liegt der Fokus der Mehrdeutigkeitslösung auf jenen Methoden, die das Potenzial haben, eine schnelle Lösung der Mehrdeutigkeit der CPC-Beobachtungen zu gewährleisten. Im Beobachtungsraum wird entweder ein geometriefreies oder ein geometriebasiertes oder ein geometriereduziertes Verfahren eingesetzt. Test und Ergebnisse der Mehrdeutigkeitsfixierung mit Galileo E5-Daten werden in Kapitel 6 ausführlich vorgestellt.

2.7.1 Geometriefreie Mehrdeutigkeitslösung

Das Galileo E5-Signal ermöglicht im Vergleich zu anderen GNSS-Signalen sehr präzise Codestreckenmessungen (weniger rauschanfällig, niedrige Multipath-Einflüsse). In der Prozessierung der E5-Daten soll zunächst der geometriefreie Ansatz zur Mehrdeutigkeitsbestimmung durchgeführt werden. Aufgrund der oben genannten Qualitäten der Galileo E5-Einfrequenz-Daten kann der Mehrdeutigkeitsterm theoretisch aus einer direkten Kombination von Codestrecken- und Trägerphasenmessungen ohne Zuhilfenahme geometrischer Parameter (Satelliten- und Antennenkoordinaten) gewonnen werden. Die einschlägigen Gleichungen lauten, wie bereits dargestellt, für die Codestreckenmessung:

$$PR_{i,E5}^k = \rho_{i,E5}^k + c \cdot (\delta_i - \delta_i^k) + \delta_{i,E5}^k + \delta T_{i,E5}^k + \varepsilon_{pi,E5}^k \quad (2-77)$$

und für die Trägerphasenmessung:

$$\Phi_{i,E5}^k = \rho_{i,E5}^k + c \cdot (\delta_i - \delta_i^k) - \lambda \cdot N_{i,E5}^k - \delta_{i,E5}^k + \delta T_{i,E5}^k + \varepsilon_{\Phi,i,E5}^k \quad (2-78)$$

Wie im Unterkapitel 2.4, erwähnt unterscheiden sich die beiden Gleichungen (2-77 und 2-78) im Vorzeichen der ionosphärischen Laufzeitverzögerung sowie dadurch, dass der Mehrdeutigkeitsterm nur bei der Trägerphasenmessung auftaucht. Durch eine Subtraktion der Gleichung (2-77) von der Gleichung (2-78) wird der Mehrdeutigkeitsterm zusammen mit der ionosphärischen Laufzeitverzögerung isoliert:

$$\lambda_{E5} \cdot N_{i,E5}^k = \Phi_{i,E5}^k - PR_{i,E5}^k + 2\delta_{i,E5}^k \quad (2-79)$$

Eine Bestimmung des Mehrdeutigkeitsterms N ist nur gewährleistet, wenn $\lambda \cdot N$ auf $0,1 \cdot \lambda \dots 0,3 \cdot \lambda$ ($\approx 2 \dots 8$ cm für E5) genau bestimmbar ist. Das relativ hohe Rauschniveau und vor allem der Einfluss von Multipath auf die Codestreckenmessung, der im Regelfall insgesamt im Bereich zwischen einigen Zentimetern bis hin zu Dezimetern liegen kann, erschweren die Erfüllung der oben genannten Bedingung und somit die Lösung der Mehrdeutigkeit. Im Fall einer sehr günstigen Situation (z.B. im freien Gelände) liegt der Multipath-Einfluss nur im Bereich weniger Zentimeter, so dass die genaue Bestimmung von $\lambda \cdot N$ möglich ist. Durch die Bildung von doppelten Differenzen wird die oben erwähnte Restriktion noch abgemildert:

$$\nabla \Delta \cdot N_{AB,E5}^{kl} = \frac{\nabla \Delta \Phi_{AB,E5}^{kl} - \nabla \Delta PR_{AB,E5}^{kl} + 2\nabla \Delta \delta_{AB,E5}^{kl}}{\lambda_{E5}} \quad (2-80)$$

Bei dieser Gleichung (2-80) spielt die ionosphärische Laufzeitverzögerung bei Einfrequenz-Daten eine Rolle und geht sogar mit doppelter Amplitude in die Gleichung ein. Bei kurzen Basislinien kann der ionosphärische Einfluss durch die Bildung von doppelten Differenzen vernachlässigt werden. Für lange Basislinien muss eine Methode zur Anwendung kommen, die den Ionosphärenfehler beseitigen kann. Dies kann beispielsweise über die CPC-Kombination bewerkstelligt werden. Da das breitbandige Galileo E5-Signal bekanntlich zwei Subträgerfrequenzen E5a (1176.45 MHz) und E5b (1207.14 MHz) besitzt, die beim Tracking des Signals isoliert werden können (siehe Kap. 2.1.1 und SIMKY et. al. [2008]), kann auch über die lineare Kombination von E5 mit einer der Subfrequenzen versucht werden, den Ionosphären-Störanteil zu eliminieren. Werden die geometrische Distanz und die in den Pseudostrecken enthaltenen nicht-dispersiven Signalanteile (troposphärischer Fehler, Multipath etc.) dergestalt zusammengefasst,

$$\nabla \Delta \rho_{A,j}^{kl*} = \nabla \Delta \rho_{A,j}^{kl} + \delta T_{A,j}^{kl} + \varepsilon_{A,j}^{kl} \quad (2-81)$$

so lassen sich die vier Beobachtungsgleichungen bei Nutzung des Index (1) für E5 und des Index (2) für E5a bzw. E5b wie folgt vereinfacht ausdrücken:

$$L = [PR_1 \quad \Phi_1 \quad PR_2 \quad \Phi_2] \quad (2-82)$$

mit:

$$PR_1 = \rho^* + \frac{I}{f_1^2} \quad (2-83a)$$

$$\Phi_1 = \rho^* - \frac{I}{f_1^2} + \lambda_1 \cdot N_1 \quad (2-83b)$$

$$PR_2 = \rho^* + \frac{I}{f_2^2} \quad (2-83c)$$

$$\Phi_2 = \rho^* - \frac{I}{f_2^2} + \lambda_2 \cdot N_2 \quad (2-83d)$$

Der Vektor der Unbekanntenparameter, bestehend aus der Distanz (mit allen nicht-dispersiven Signalanteilen), der ionosphärischen Laufzeitverzögerung und den Mehrdeutigkeiten auf E5 und E5a (bzw. E5b), ergibt dann:

$$L = \left[\rho^*, \frac{I}{f_1^2}, N_1, N_2 \right] \quad (2-84)$$

Damit kann die Designmatrix nach GOAD [1992] folgendermaßen aufgestellt werden:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & \lambda_1 & 0 \\ 1 & \frac{f_1^2}{f_2^2} & 0 & 0 \\ 1 & -\frac{f_1^2}{f_2^2} & 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (2-85)$$

Die Kovarianzmatrix der Unbekanntenparameter wird vereinfacht und blockweise so dargestellt:

$$\underline{\Sigma}_{XX} = \begin{bmatrix} \underline{\Sigma}_{11} & \underline{\Sigma}_{1N} \\ \underline{\Sigma}_{1N} & \underline{\Sigma}_{NN} \end{bmatrix} \quad (2-86)$$

Die direkte Bestimmung der Integerwerte N_1 und N_2 der Mehrdeutigkeiten ist nicht möglich, daher kann sie über eine Spektralzerlegung der Submatrix $\underline{\Sigma}_{NN}$ versucht werden:

$$\underline{\Sigma}_{NN} = \underline{S} \cdot \underline{\Lambda} \cdot \underline{S}^T = \begin{bmatrix} \underline{s}_1 & \underline{s}_2 \end{bmatrix} \cdot \underline{\Lambda} \cdot \begin{bmatrix} \underline{s}_1^T \\ \underline{s}_2^T \end{bmatrix} \quad (2-87)$$

\underline{S} : Matrix mit Eigenvektoren

$\underline{\Lambda}$: Diagonalmatrix mit Eigenwerten

\underline{s}_1 : Zum Eigenwert λ_i gehöriger Eigenvektor

Die (Real-) Kombination nach HOLLMANN [2000]

$$\bar{N} = s_{\min}^{*T} \cdot \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \end{bmatrix} \quad (2-88)$$

ist diejenige Linearkombination, die die minimale Varianz für σ_N ergibt. Diese Kombination entspricht ungefähr der als „Wide Lane“ bekannten Kombination (WÜBBENA [1989a]) mit den Koeffizienten (1/-1). Es muss noch berücksichtigt werden, dass die im Modell noch enthaltenen Störeinflüsse (Troposphärenfehler) den Integer-Charakter der Mehrdeutigkeiten stören können. Über kurze Basislinien können die Störeinflüsse mit der doppelten Differenzbildung eliminiert werden.

Die Bestimmung der Integer-Werte für N_1 und N_2 verläuft über die Berechnung der „Wide Lane“-Mehrdeutigkeit. Die Gleichung für die „Wide Lane“-Kombination der Phasemessungen lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$\Phi_{WL} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \Phi_1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \Phi_2 \quad (2-89)$$

Diese Gleichung, angewendet auf (2-83b), ergibt:

$$\Phi_{WL} = \rho^* - \frac{I}{f_1 \cdot f_2} + \lambda_{WL} \cdot N_{WL} \quad (2-90)$$

Für die Codemessungen werden sogenannte „Narrow Lane“-Kombinationen gebildet. Die dafür gewählten Koeffizienten lauten $i_1 = 1$, und $i_2 = 1$:

$$PR_{NL} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot PR_1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot PR_2 \quad (2-91)$$

und

$$PR_{NL} = \rho^* + \frac{I}{f_1 \cdot f_2} \quad (2-92)$$

Die Mehrdeutigkeitsparameter der „Wide Lane“ N_{WL} werden dann durch die Differenzbildung von „Wide Lane“-Phasemessungen und „Narrow Lane“-Codemessungen berechnet:

$$\Phi_{WL} - PR_{NL} = \lambda_{WL} \cdot N_{WL} \quad (2-93)$$

und

$$N_{WL} = \frac{\Phi_{WL} - PR_{NL}}{\lambda_{WL}}$$

$$\tilde{N}_{WL} = \text{round}[N_{WL}]$$

Aus der letzten Gleichung entstehen zuerst realwertige Mehrdeutigkeitsparameter, die anschließend auf Integer-Werte \tilde{N}_{WL} gerundet werden³⁷. Durch die Kombination von (2-83) und (2-89) können die Mehrdeutigkeitsparameter N_1 und N_2 bestimmt werden:

$$\Phi_{WL} - \Phi_i = I \left(\frac{1}{f_1^2 + f_2^2} + \frac{1}{f_i^2} \right) + \lambda_{WL} \cdot \tilde{N}_{WL} - \lambda_i \cdot N_i \quad (2-94)$$

$$N_i = \frac{\Phi_{WL} - \Phi_i}{\lambda_i} + \frac{1}{c} \cdot I \left(\frac{f_1 + f_2}{f_1^2 + f_2^2} \right) + \frac{\lambda_{WL}}{\lambda_i} \cdot \tilde{N}_{WL}$$

c : Lichtgeschwindigkeit

\tilde{N}_{WL} : gerundeter Mehrdeutigkeitsparameter

Damit werden die Integer-Werte der Mehrdeutigkeiten der Trägermessungen für E5 und E5a ermittelt. Der Mehrdeutigkeitswert der neu gebildeten E5 CPC-Beobachtung beträgt nur die Hälfte des E5-Terms:

$$\nabla \Delta N_{CPC} = \frac{\nabla \Delta N_{CPC}}{2} = \frac{N_1}{2} \quad (2-95)$$

Der entscheidende Schritt im hier beschriebenen Prozess ist die Bestimmung von N_{WL} , die einen Genauigkeitsgewinn mit sich bringt und somit die Integer-Fixierung der Trägerphasenmessung erlaubt. Daraus lässt sich der doppelt differenzierte Mehrdeutigkeitswert für die CPC-Beobachtung bestimmen.

2.7.2 Geometriebasiertes Verfahren

Das geometriebasierte Verfahren beruht auf der Nutzung der geometrischen Information der Beobachtungen, um die Mehrdeutigkeit abzuleiten. Wenn der troposphärische Parameter zunächst vernachlässigt wird, kann der Ergebnisvektor der Positionierung in zwei Subvektoren (Positionsvektor und Mehrdeutigkeitsvektor) zerlegt werden, genauso die zugehörige Kovarianzmatrix, SCHÜLER [2006].

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} \underline{X}_{\nabla \Delta N} \\ \underline{X}_{XYZ} \end{bmatrix} \quad \wedge \quad \underline{\Sigma}_{XX} = \begin{bmatrix} \underline{\Sigma}_{\nabla \Delta N} & \underline{\Sigma}_{XYZ, \nabla \Delta N} \\ \underline{\Sigma}_{XYZ, \nabla \Delta N} & \underline{\Sigma}_{XYZ} \end{bmatrix} \quad (2-96)$$

³⁷ WENTAO [2005], auch ODIJK [2002] oder FREI und BEUTLER [1990B] behandeln ausführlich das Rundungsverfahren.

Die fixierten Mehrdeutigkeiten $\underline{X}_{\nabla\Delta N}^{FIX}$ werden über die zuvor bestimmten Fließkommazahlen-Mehrdeutigkeiten ermittelt. Die Aufgabe der Fixierung der Mehrdeutigkeit kann in der Minimierung des folgenden Ausdrucks zusammengefasst werden:

$$\chi^2 = \left(\underline{X}_{\nabla\Delta N}^{Float} - \underline{X}_{\nabla\Delta N}^{FIX} \right) \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1} \cdot \left(\underline{X}_{\nabla\Delta N}^{Float} - \underline{X}_{\nabla\Delta N}^{FIX} \right) \rightarrow \min \quad (2-97)$$

Nach WERNER [1999] beschreibt das Ergebnis ein n-dimensionales Hyper-Ellipsoid. Die Integer-Eigenschaften der Lösung erschweren die Mehrdeutigkeitsbestimmung erheblich.

Unter den vielen Methoden zur Lösung dieser Aufgabe ist die „Integer Least-Squares“-Suche nach TEUNISSEN [1995] am weitesten verbreitet. Sie wurde von DE JONGE und TIBERIUS [1996] ausführlich dokumentiert und ist seitdem unter dem Begriff „LAMBDA-Methode“ („Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment“) bekannt. Die Methode beinhaltet eine strikte Erweiterung der Standard-„Kleinste-Quadrate“-Methode auf die Integer-Domäne. Die Innovation dieses Verfahrens ist eine dekorrelierende Reparametrisierung der Mehrdeutigkeiten, mit der die Zahl der „kleinste Quadrate“-Schätzungen sehr schnell und effizient berechnet werden kann. Die Implementierung der ganzzahligen „Kleinste Quadrate“-Schätzung ist eine Suche in einem Hyper-Ellipsoid, das durch die Kovarianzmatrix der Mehrdeutigkeiten $\underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}$ (bzw. deren Inversen $\underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1}$) definiert wird. In der Praxis werden alle möglichen Mehrdeutigkeiten in einer Ellipse zusammengefasst (siehe Abbildung 2-11). Starke Korrelationen zwischen den Mehrdeutigkeiten führen zu einer Längung der Ellipse (vgl. linke Abbildung 2-11). Um eine geeignete Dekorrelation der Mehrdeutigkeiten herbeizuführen, wird eine Transformation der Mehrdeutigkeiten mit der Transformationsmatrix \underline{Z} durchgeführt:

$$\underline{X}_{\nabla\Delta N}^{DK} = \underline{Z}^T \cdot \underline{X}_{\nabla\Delta N}^{Float} \quad (2-98a)$$

und

$$\underline{X}_{\nabla\Delta N}^{DK, FIX} = \underline{Z}^T \cdot \underline{X}_{\nabla\Delta N}^{FIX} \quad (2-98b)$$

Die Transformation verwandelt die flache Ellipse in eine eher kreisförmige (siehe rechte Abbildung 2-11).

Die Transformationsmatrix \underline{Z} besteht aus ganzzahligen Werten, sie muss invertierbar sein und ihre Inverse darf auch nur ganzzahlige Werte enthalten (siehe MISRA und ENGE [2001]). Falls diese Bedingungen nicht erfüllt sind, verlieren die Mehrdeutigkeiten ihre Integer-Eigenschaften. Die transformierte Kovarianzmatrix ergibt:

$$\underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{DK} = \underline{Z}^T \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N} \cdot \underline{Z} \quad (2-99)$$

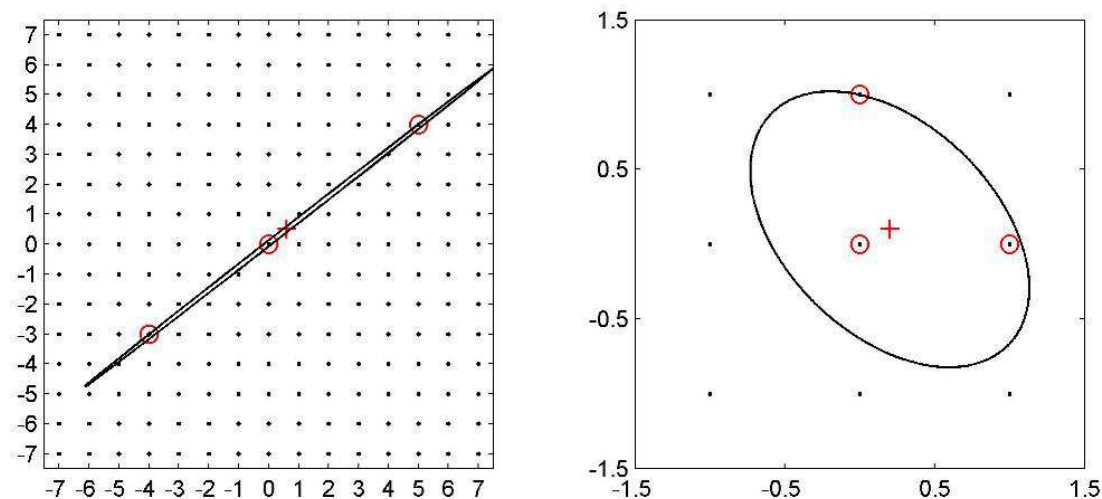


Abbildung 2-11: Darstellung der Suchellipse der LAMBDA-Methode vor (links) und nach (rechts) der Transformation, Quelle: <http://lr.tudelft.nl/en/organisation/departments-and-chairs/remote-sensing/mathematical-geodesy-and-positioning/research/lambda-method/>

Im transformierten Suchraum erhält man nun folgende Gleichung:

$$\left(\underline{X}_{\nabla\Delta N}^{DK} - \underline{X}_{\nabla\Delta N}^{DK, FIX} \right) \cdot \underline{Z} \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1} \cdot \underline{Z}^{-1} \cdot \left(\underline{X}_{\nabla\Delta N}^{DK} - \underline{X}_{\nabla\Delta N}^{DK, FIX} \right) \quad (2-100)$$

Da $\underline{Z} \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1} \cdot \underline{Z}^{-1}$ eine diagonale Matrix ist, ergibt sich die Lösung für $\underline{X}_{\nabla\Delta N}^{DK, FIX}$ sofort durch Abrundung jedes Elements von $\underline{X}_{\nabla\Delta N}^{DK}$. Danach wird eine Rücktransformation durchgeführt:

$$\underline{X}_{\nabla\Delta N}^{FIX} = \underline{Z}^{-T} \cdot \underline{X}_{\nabla\Delta N}^{DK, FIX} \quad (2-101)$$

Eine diagonale inverse Matrix $\underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1}$ würde die Berechnung vereinfachen. Leider ist dies nicht der Fall und eine völlige Dekorrelation der Integer-Mehrdeutigkeiten wird auch niemals erreicht, so dass nicht einfach eine Rundung auf den nächsten ganzzahligen Wert erfolgen kann. EULER UND LANDAU [1992] nutzen eine Cholesky-Zerlegung der Kovarianzmatrix der Mehrdeutigkeit in eine Dreiecksmatrix, um damit eine optimierte Rechenzeit zu erreichen.

Die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Mehrdeutigkeitsfixierung wird in Form der Erfolgsrate („Success Rate“) geäußert (siehe TEUNISSEN [2000]). ODIJK [2002] gibt an, dass diese Wahrscheinlichkeit in der Theorie stets als

$$P(N_{LAMBDA} = N_{WAHR}) > \left(2\Phi\left(\frac{1}{ADOP}\right) - 1 \right)^q \quad (2-102)$$

angenommen werden kann.

q ist die Anzahl der Freiheitsgrade. TEUNISSEN [1997] definiert den ADOP („Ambiguity Dilution of Precision“) wie folgt:

$$ADOP = \sqrt[n]{\det \underline{\Sigma}_{\underline{X}_{\nabla\Delta N}}^{FIX}} \quad (2-103)$$

Im weiteren Ablauf zur Prozessierung der Galileo E5-Einfrequenz-Daten wird die LAMBDA-Methode eine große Rolle bei der Fixierung der Koordinaten spielen. Die fixierten Koordinaten $\underline{X}_{XYZ}^{FIX}$ werden durch eine erneute Ausgleichung, nun unter Nutzung der ganzzahligen Mehrdeutigkeitsterme, berechnet. Dabei werden die Mehrdeutigkeiten nicht mehr als Parameter betrachtet, sondern gehen als Konstante in die Beobachtungsgleichungen ein. TEUNISSEN [2003] beschreibt die Berechnung der fixierten Positionslösung dergestalt

$$\underline{X}_{XYZ}^{FIX} = \underline{X}_{XYZ} - \underline{\Sigma}_{XYZ,\nabla\Delta N} \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1} \cdot \left(\underline{X}_{\nabla\Delta N} - \underline{X}_{\nabla\Delta N}^{FIX} \right) \quad (2-104)$$

und die Kovarianzmatrix:

$$\underline{\Sigma}_{XYZ}^{FIX} = \underline{\Sigma}_{XYZ} - \underline{\Sigma}_{XYZ,\nabla\Delta N} \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1} \cdot \underline{\Sigma}_{XYZ,\nabla\Delta N} + \underline{\Sigma}_{XYZ,\nabla\Delta N} \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1} \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{FIX} \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1} \cdot \underline{\Sigma}_{XYZ,\nabla\Delta N} \quad (2-105)$$

Bei einer richtigen Fixierung der Mehrdeutigkeiten ergibt

$$\underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{FIX} = \underline{0} \quad (2-106)$$

und somit:

$$\underline{\Sigma}_{XYZ}^{FIX} = \underline{\Sigma}_{XYZ} - \underline{\Sigma}_{XYZ,\nabla\Delta N} \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1} \cdot \underline{\Sigma}_{XYZ,\nabla\Delta N} \quad (2-107)$$

2.7.3 Geometriereduziertes Verfahren

Der geometriereduzierte Ansatz vereint die Eigenschaften des geometriefreien und geometriebasierten Ansatzes. Bei dieser Methode reichen Informationen über die Näherungspositionen der Antenne aus, um die Mehrdeutigkeiten zu lösen. Dabei wird auf die Verwendung der Streckenmessungen verzichtet und es werden Linearkombinationen ausgewählt, so dass der Einfluss geometrischer Fehler reduziert ist. Damit wird erreicht, dass die Mehrdeutigkeitsterme innerhalb gewisser Grenzen nicht durch eine ungenaue Position beeinflussbar sind, SCHÜLER [2006].

Darüber hinaus werden nur Linearkombinationen mit großen virtuellen Wellenlängen ausgewählt, um die Mehrdeutigkeitsfindung zu vereinfachen. Die Tabelle 2-6 zeigt ausgewählte Linearkombinationen des E5-Signals mit seinen zwei Subträgerfrequenzen E5a und E5b, die die zuvor genannten Kriterien erfüllen.

Signal	Linear-kombinationsko- effizient		Wellen- länge λ_{LK} [mm]	Ionosphären- Verstärkungs- faktor $ V_{ION} $	$\frac{ION_{LK}[m]}{ION_{E5\{E5a,E5b\}}[m]}$	Standard- abweichung $\sigma_{\varphi,LK}$ [mm]
	a_1	a_2			$\frac{ION_{LK}[m]}{ION_{E5\{E5a,E5b\}}[m]}$	
E5a/E5	1	1	19537	1.000	0.987	109.13
	2	1	258	1.040	1.026	2.27
	* (50	49)	706	4.578	4.519	195.24)
E5bE5	1	1	19537	1.000	1.013	110.54
	2	3	258	1.066	1.080	3.72
	* (49	50)	682	4.453	4.511	190.87)
E5a/E5b/E5	a_1	a_2	a_3	λ_{LK} [mm]	$ V_{ION} $	$\sigma_{\varphi,LK}$ [mm]
	1	0	1	19537	0.987	109.13
	1	1	0	9768	0.975	54.92
	2	5	-4	276	1.167	7.42
	* (7	9	-3)	317	1.480	14.89)

Tabelle 2-6: Ausgewählte Linearkombinationen von E5, E5a und E5b; * Kontrollgleichung,

In der Tabelle 2-6 stellt $|V_{ION}|$ der Verstärkungsfaktor des Ionosphärenfehlers dar und $\frac{ION_{LK}[m]}{ION_{E5\{E5a,E5b\}}[m]}$ ist das Verhältnis des Ionosphäreinflusses der Linearkombination zu der Grundfrequenz E5, E5a bzw. E5b.

Ausgehend von den Mehrdeutigkeiten der Linearkombination (N_a, N_b, N_c) können exemplarisch für drei Frequenzen (E5 und ihre beiden Subträger E5a und E5b) die originären Mehrdeutigkeiten (N_1, N_2, N_3) berechnet werden:

$$\begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} N_a \\ N_b \\ N_c \end{pmatrix} \quad (2-108)$$

Zur Überprüfung der Korrektheit der Mehrdeutigkeitsfixierung (N_1, N_2, N_3) kann im Fall einer Zwei-Frequenzkombination eine dritte Linearkombination bzw. im Fall einer Drei-Frequenzkombination eine vierte Linearkombination zum Einsatz kommen. Da die Kombination des E5-Signals mit seinen Unterträgern E5a und E5b das Rauschniveau signifikant erhöht, wird die geometriereduzierte Methode aber nur selten verwendet.

2.7.4 Kombinationsverfahren zur schnellen Mehrdeutigkeitslösung

Zur Erzielung der schnellsten Mehrdeutigkeitslösung schlägt SCHÜLER [2006] vor, eine Kombination der zuvor beschriebenen Methoden in einer Lösungskette durchzuführen. Die Abbildung 2-12 beschreibt eine solche Kombination mit zwei Lösungsketten zur Fixierung der Mehrdeutigkeit.

Im ersten Schritt wird eine geometriefreie Bestimmung der Mehrdeutigkeitssterme durchgeführt. Das Hauptziel ist hier die Bereitstellung von Näherungswerten.

Die Linearkombination von Galileo E5 mit seinen Subträgern erlaubt die Bildung von „Super Wide Lane“-Kombinationen mit einer Wellenlänge von ca. 19 m (zwei Frequenzen) und 9 m (drei Frequenzen).

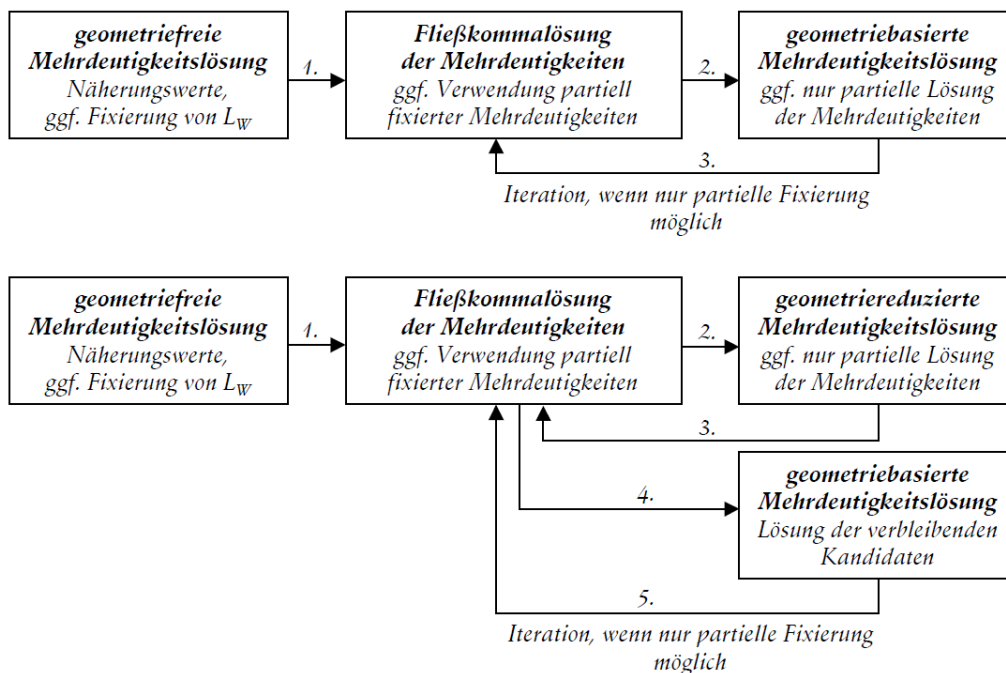


Abbildung 2-12: Darstellung der Lösungsketten zur Bestimmung der Mehrdeutigkeiten; Quelle Habilitationsarbeit von SCHÜLER [2006].

Bei der Wahl der Linearkombination muss ein Spagat zwischen einer möglichst großen Wellenlänge und einem möglichst geringen Ionosphärenfehler gemacht werden. Im günstigsten Fall kann es gleich bei der Bildung der „Wide Lane“-Kombination zu einer direkten Fixierung der Mehrdeutigkeiten kommen. Im nächsten Schritt werden die Fließkommazahlen der Mehrdeutigkeitsparameter während der Blockausgleichung (siehe 2.5.3) geschätzt. Zuletzt werden die Mehrdeutigkeiten über das geometriebasierte Verfahren insbesondere mit der LAMBDA-Methode festgesetzt. Sollte nur eine partielle Fixierung der Mehrdeutigkeiten erfolgt sein, können Iterationen ab dem zweiten Schritt durchlaufen werden. Damit wird die Fließkommallösung mit Hilfe der partiell fixierten Mehrdeutigkeiten verbessert, um anschließend die Erfolgsrate der verbleibenden Kandidaten während der geometriebasierten Mehrdeutigkeitslösung zu erhöhen.

Beim Vorliegen kurzer Basislinien kann eine Alternative verwendet werden. Dabei erfolgt nach der Fließkommallösung die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten mit der geometriereduzierten Methode. Der Vorteil dieses Vorgehens ist die Verbindung einer näherungsweise Positionslösung mit einer einfach zu implementierenden Mehrdeutigkeitsbestimmung. Bei nicht kompletter Fixierung der Mehrdeutigkeiten werden die Parameter an die geometriebasierte Methode übergeben. Hier, wie auch bei der zuvor beschriebenen Vorgehensweise, können Iterationen bis zu einer vollständigen Fixierung der Mehrdeutigkeiten durchgeführt werden. Letztlich hängt die Erfolgsrate der Mehrdeutigkeitslösung von der Präsenz und der Mitigation der systematischen Fehler ab.

3 Fehlerbetrachtung

GNSS-Messungen werden durch eine Vielzahl von Fehlerquellen beeinflusst. Durch die Bildung von doppelten Differenzen können gravierende korrelierende Fehler wie die Satelliten- und Empfängeruhrfehler aber komplett beseitigt werden. Da die hier behandelten Galileo E5-Einfrequenz-Ansätze doppelte Differenzen verwenden, werden bereits während der Prozessierung der Messungen viele korrelierende Fehler eliminiert. Dennoch beeinträchtigen einige Fehler weiterhin die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse. Diese Fehlereinflüsse müssen eliminiert oder auf ein möglichst niedriges Niveau mitigiert werden, um z.B. überhaupt eine erfolgreiche Fixierung der Mehrdeutigkeiten in den CPC-Beobachtungen vornehmen zu können. Somit werden präzise Positionsergebnisse innerhalb von kurzer Zeit erzielt. Diese Fehlereinflüsse werden im Verlauf dieses Kapitels behandelt und geeignete Auswertungsmethoden zu deren Eliminierung oder zumindest Reduzierung beschrieben. Es wird darauf hingewiesen, dass nicht alle Einflussfaktoren auf GNSS-Messungen hier detailliert untersucht werden, sondern nur die relevanten Fehler mit Bezug auf die Genauigkeitsanforderung der Einfrequenz-Positionsergebnisse.

Diese Fehler beschränken sich auf:

- das Messrauschen von Code- und Trägerphasenmessungen,
- die Antennenfehler (Phasenzentrumsunterschiede und -variationen),
- die Phasensprünge,
- die Mehrwegeeffekte,
- die relativistischen Effekte,
- die Stationsbewegungen,
- die Gezeiten der festen Erde,
- die ozeanischen Auflasten,
- die Erdrotation und die Polbewegung,
- den Satellitenbahnfehler und
- die atmosphärische Refraktion (hier nur die troposphärische Laufzeitverzögerung).

Die Größenordnungen der erwähnten Fehlereinflüsse liegen meist über dem Zentimeter-Bereich, was die CPC-Positionsergebnisse eindeutig verschlechtert. Beim RCF-Ansatz schätzt der Kalman Filter nur die atmosphärischen Laufzeitverzögerungen als unbekanntes Parameter. Somit werden die RCF-Genauigkeiten nicht über den Dezimeter- bis Subdezimeter-Bereich hinausreichen.

3.1 Berücksichtigung der Fehlereinflüsse im Prozessierungsmodell

Die Kenntnisse über Modellstörungen und Verfahren zur Modellverbesserung sind der Schlüssel der präzisen Positionierung. Einige Fehler können funktional modelliert werden, d.h. ihre Werte werden in einer deterministischen Weise ermittelt. Andere Fehler können nicht ohne signifikante Restfehler bestimmt werden. Diese werden in einem ersten Schritt funktional modelliert und die verbleibenden Restfehler werden, sofern sie sich zufällig verhalten, stochastisch modelliert. Im stochastischen Modell werden die Fehler für die Berechnung der Varianzen verwendet, die zur Bildung der Kovarianzmatrix genutzt werden. Das Ziel dieses Prozesses ist eine bessere

Beschreibung der Realität durch Modifikationen innerhalb des Gauß-Markov-Modells im Unterkapitel 2.5.

Werden die Beobachtungen L als Funktion ψ der Unbekannten X in Matrixschreibweise ausgedrückt, nämlich

$$\underline{L} = \underline{\psi}(X) \quad (3-1)$$

so sind zunächst in ψ die funktionalen Zusammenhänge zu beschreiben. Der funktionale Zusammenhang zwischen Satelliten- und Empfängerposition berechnet sich im Wesentlichen durch das Pythagoras-Gesetz, siehe Gleichung (2-7). Die präzise Positionierung erfordert jedoch zusätzlich das Heranziehen anderer Fehlerquellen in das funktionale Modell. Liegen die Varianzen und Kovarianzen nicht bereits im Beobachtungsraum vor, werden sie über Fehlerfortpflanzung in das Modell eingeführt. Die Funktionalmatrix - auch Jacobi-Matrix genannt und hier als F gekennzeichnet - hat so viele Spalten, wie Messgrößen auftreten, und so viele Zeilen wie zu betrachtende Unbekanntparameter:

$$F = \left(\frac{\partial \psi(\underline{X})}{\partial \underline{X}} \right)_X = \begin{bmatrix} \frac{\partial L_1}{\partial x_1} & \frac{\partial L_1}{\partial x_2} & \dots \\ \frac{\partial L_2}{\partial x_1} & \frac{\partial L_2}{\partial x_2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

Eine Taylor-Entwicklung der Jacobi-Matrix mit dem Abbruch nach dem ersten Glied ist zulässig und erlaubt es, die funktionalen Zusammenhänge zu linearisieren. Somit kann die Kovarianzmatrix wie folgt formuliert werden:

$$\underline{\Sigma}_{LL} = \underline{F} \cdot \underline{\Sigma}_{XX} \cdot \underline{F}^T \quad (3-3)$$

Bei der Kovarianzmatrix muss zwischen nicht-korrelierend wirkenden Fehlern und korrelierend wirkenden Fehlern unterschieden werden.

Die nicht-korrelierenden Fehler wirken sich nur abgegrenzt auf einzelne Abweichungen aus. Damit erscheint die Kovarianzmatrix der Fehler als Diagonalmatrix:

$$\underline{\Sigma}_{\delta\delta} = \begin{bmatrix} \sigma_{\delta_1}^2 & & \\ & \sigma_{\delta_2}^2 & \\ & & \ddots \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

Korrelierende Fehler wirken aufgrund funktionaler Beziehungen aufeinander ein. Dies bedeutet, dass sie voneinander stochastisch abhängig sind und die Kovarianzmatrix symmetrisch, aber voll besetzt, ist:

$$\underline{\Sigma}_{\gamma_i} = \begin{bmatrix} \underline{\sigma}_{\gamma_1}^2 & \rho_{12} \cdot \sigma_{\gamma_1} \cdot \sigma_{\gamma_2} & \cdots \\ & \underline{\sigma}_{\gamma_2}^2 & \cdots \\ & & \ddots \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

Eine Modellerweiterung umfasst nun die Hinzunahme von zusätzlichen Unbekannten und Beobachtungen. Das Gesamtmodell ergibt:

$$\tilde{\underline{L}}_1 = \underline{\psi}_1(\tilde{\underline{X}}, \tilde{\underline{Y}}) \quad (3-6)$$

$$\tilde{\underline{L}}_2 = \underline{\psi}_2(\tilde{\underline{X}}, \tilde{\underline{Y}})$$

\underline{L}_2 : Hinzugenommene Beobachtungen

\underline{Y} : Hinzugenommene Parameter

Das Verbesserungsgleichungssystem lautet nun dergestalt:

$$\begin{bmatrix} \underline{l}_1 \\ \underline{l}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{v}_1 \\ \underline{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_X & \underline{A}_Y \\ \underline{B}_X & \underline{B}_Y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\underline{x}} \\ \hat{\underline{y}} \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

Mit

$$\underline{A}_X = \frac{\partial \underline{\psi}_1(\underline{X}, \underline{Y})}{\partial \underline{X}}; \quad \underline{A}_Y = \frac{\partial \underline{\psi}_1(\underline{X}, \underline{Y})}{\partial \underline{Y}} \quad (3-8)$$

$$\underline{B}_X = \frac{\partial \underline{\psi}_2(\underline{X}, \underline{Y})}{\partial \underline{X}}; \quad \underline{B}_Y = \frac{\partial \underline{\psi}_2(\underline{X}, \underline{Y})}{\partial \underline{Y}}$$

Das stochastische Modell wird dann mit

$$\underline{Q}_{ll} = \frac{1}{\sigma_0^2} \cdot \underline{\Sigma}_{ll} = \begin{bmatrix} \underline{\Sigma}_{l_1 l_1} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{\Sigma}_{l_2 l_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{Q}_{l_1 l_1} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{Q}_{l_2 l_2} \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

beschrieben.

Die Normalgleichungsmatrix ergibt:

$$\underline{N} = \underline{A}^T \cdot \underline{P}_{l_1 l_1} \cdot \underline{A} + \underline{B}^T \cdot \underline{P}_{l_2 l_2} \cdot \underline{B} \quad (3-10)$$

mit

$$\underline{P}_{l_1 l_1} = \underline{Q}_{l_1 l_1} \quad \text{und} \quad \underline{P}_{l_2 l_2} = \underline{Q}_{l_2 l_2}$$

Somit werden die zusätzlichen Fehler im Modell berücksichtigt und die genauen Koordinaten können nun geschätzt werden.

3.2 Fehlereinflüsse

3.2.1 Das Messrauschen von Code- und Trägerphasenmessungen

Die Leistung eines GNSS-Empfängers hängt stark vom Einfluss des Messrauschens ab. Das Empfängerrauschen beeinflusst unmittelbar das Signal-zu-Rausch-Verhältnis, das wiederum ein entscheidender Parameter für die Tracking-Leistung des Empfängers ist. Grundsätzlich hängt das Messrauschen vom Empfängertyp ab. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis kann in Trägerphasen- und Codeverzögerungen umgerechnet werden und bestimmt somit die Genauigkeit der Pseudostrecken- und Trägerphasenmessungen. Der CPC-Ansatz für die Einfrequenz-Positionierung beruht u.a. auf dem im Vergleich zu allen anderen Signalen geringsten Codemessrauschen des Galileo E5-Signals.

Die Genauigkeit der Codestreckenmessungen wird durch thermisches Rauschen beeinträchtigt, das hauptsächlich von der Art des DLL („Delay Lock Loop“)³⁸-Diskriminators abhängt (siehe IRSIGLER et al. [2002]). Nach PARKINSON und SPILKER [1996] werden drei Arten von Diskriminatoren allgemein bezüglich des Rauschverhaltens verwendet: Der nicht-kohärente „Early-minus-Late“-Leistungsdiskriminator, der nicht kohärente Skalarprodukt-Diskriminator und der kohärente DLL-Diskriminator, der auch für die parallele Verfolgung von Trägerphasenmessungen befähigt ist:

- Der nichtkohärente „Early-minus-Late“-Leistungsdiskriminator: Er ist der robusteste Diskriminator mit einer DLL-Rauschen-Standardabweichung, die durch Verwendung des folgenden Ausdrucks berechnet werden kann:

$$\sigma_c = T_c \sqrt{\frac{B_L d}{2 \cdot c/n_0} \left[1 + \frac{2}{(2-d) \cdot T \cdot c/n_0} \right]} \quad [m] \quad (3-11)$$

- d : Korrelatorenabstand zwischen „Early-Late“-Code (E-L)
- C/N₀ : Träger-zu-Rauschen-Leistung [dB-Hz]
- T : Integrationszeit [s]
- T_c : Chiplänge des Codes
- B_L : DLL-Bandbreite [Hz]

- Der nichtkohärente Skalarprodukt-Diskriminator: Nach PARKINSON UND SPILKER [1996] hat der Skalarprodukt-Diskriminator eine DLL-Rauschen-Standardabweichung von:

$$\sigma_c = T_c \sqrt{\frac{B_L d}{2 \cdot c/n_0} \left[1 + \frac{1}{T \cdot c/n_0} \right]} \quad [m] \quad (3-12)$$

³⁸ DLL ist eine elektronische Schaltung, die zur Verfolgung des Codesignal eingesetzt wird. Für detaillierte Informationen siehe MISRA und ENGE [2001]

- Der kohärente DLL-Diskriminator: In der obigen Gleichung wird der Ausdruck in der eckigen Klammer, der von der Integrationszeit T abhängt, "Quadraturverlust" genannt. Er beeinflusst das Rauschverhalten nur im Fall einer nicht-kohärenten Signalstruktur. Wenn das Signal eine kohärente Struktur enthält, d.h. (datenfreie) Trägerkomponenten, verschwindet der Quadraturverlust und das thermische Rauschen kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\sigma_c = T_c \sqrt{\frac{B_L d}{2 \cdot c/n_0}} \quad [m] \quad (3-13)$$

Um die Größenordnung der Leistung des Galileo E5-Signalausens zu zeigen, werden folgende Parameter zur Berechnung der Standardabweichung der Diskriminatoren verwendet:

- Code-Chiplänge: $T_c=29.325m$
- Datenrate: 150bps
- Integrationszeit: $T=0.0067s$
- Korrelatorenabstand: $d=0.1$ (Narrow Correlator).
- C/N0 45dBHz

Die Ergebnisse der Coderauschenanalyse sind in Tabelle 3-1 angegeben:

Diskriminator	Thermales Rauschen [m]			
	$B_L=0.25$ Hz	$B_L=0.5$ Hz	$B_L=0.75$ Hz	$B_L=1$ Hz
Nichtkohärenter E-L Diskriminator	0,021	0,030	0,039	0,045
Nichtkohärenter Skalarprodukt Diskriminator	0,025	0,032	0,039	0,045
kohärenter DLL Diskriminator	0,023	0,031	0,039	0,045

Tabelle 3-1: Thermales Rauschen des Galileo E5 AltBOC-Signals

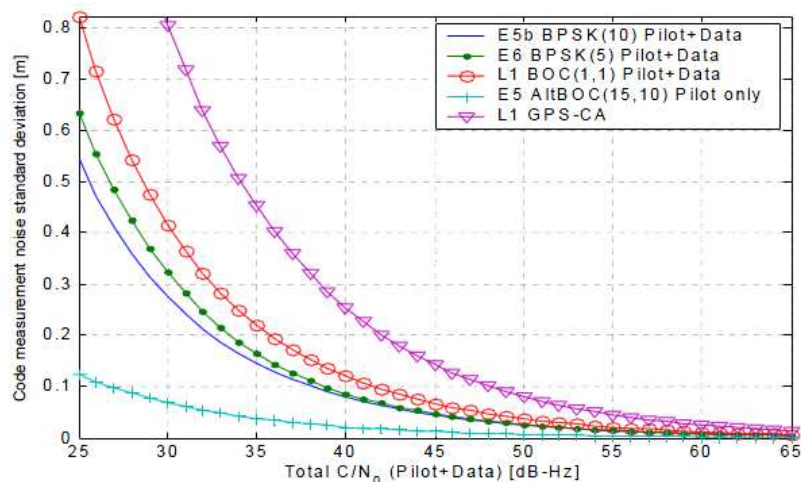


Abbildung 3-1: Tracking-Rauschen verschiedener Codestreckenmessungen als Funktion von C/N_0 , SIMSKY et al. [2005]

Die Ergebnisse und die Abbildung 3-1 bestätigen, dass das Galileo-Codestreckenrauschen deutlich kleiner als das Rauschen anderer GNSS-Signale ist.

Das Coderauschen der E5 AltBOC-Pseudostrecken ist z.B. fast um den zehnfachen Faktor kleiner als das des GPS L1C/A-Codes. Wie den obigen Formeln entnommen werden kann, hängt das Rauschen nicht von der Signalfrequenz ab. Die geringe Rauschstärke bei Galileo E5 wird von der AltBOC-Modulation begünstigt. Deshalb wird von einem modernen Galileo-Empfänger erwartet, Messungen mit einem Rauschniveau im Bereich von mindestens Dezimetern bis zu bestenfalls wenigen Zentimetern durchführen zu können.

Das Trägerphasenmessrauschen ist grundsätzlich viel geringer als das Codemessrauschen und liegt im Sub-Zentimeter- bis Millimeter-Bereich. Die AltBOC-Modulation trägt nicht direkt zur Verbesserung des Trägerphasenmessrauschens bei. Das Trägerphasenmessrauschen mit einer herkömmlichen BPSK-Modulation ergibt die gleichen Ergebnisse und belegt damit die Tatsache, dass das Trägerphasenmessrauschen nicht von der Modulation abhängt. Die Standardabweichung des Trägerphasenmessrauschens des Galileo E5-Signals wird wie bei einem BPSK-Signal berechnet und ergibt in Meter folgendes:

$$\sigma_{carrier} = \frac{\lambda_c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{B_L}{C/N_0} \cdot \left(1 + \frac{1}{2T_p \cdot C/N_0}\right)} \quad (3-14)$$

B_L (in Hz) ist die Bandbreite der PLL („Phase Lock Loop“)³⁹-Schleife, T_p ist die Prä-Detektion der Integrationszeit, C/N_0 das Signal-zu-Rausch-Verhältnis und λ_c ist die Wellenlänge der Trägerfrequenz.

Bei der Aufstellung des funktionalen Modells müssen die beschriebenen Rauschverhalten vor allem der Codestreckenmessungen sowie der Trägerphasenmessungen in Betracht gezogen werden. Grundsätzlich können Restfehler aus den Berechnungen entstehen, die stochastisch modelliert hätten werden könnten. Ihre geringe Größenordnung macht sie jedoch im Fall von Galileo E5 irrelevant für die erwartete Genauigkeit bei der Einfrequenz-Positionierung.

3.2.2 Antennenfehler

Antennenfehler sind meistens fertigungstechnische Ungenauigkeiten bei der Herstellung der Satelliten- und Empfängerantennen. Da Antennen gleichen Typs innerhalb der Fertigungstoleranzen weitgehend das gleiche Fehlerbild haben, wird ihr jeweiliges Fehlerverhalten in Abhängigkeit vom Typ beschrieben und korrigiert. Im Rahmen dieser Arbeit werden vor allem Fehler in Bezug auf das Phasenzentrum der Antennen behandelt. Das Phasenzentrum einer GNSS-Antenne ist bei jedem

³⁹ PLL ist eine elektronische Schaltungsanordnung, die die Phasenlage und damit zusammenhängend die Frequenz eines veränderbaren Oszillators über einen geschlossenen Regelkreis so beeinflusst, dass die Phasenabweichung zwischen einem äußeren Referenzsignal und dem Oszillator oder einem daraus abgeleiteten Signal möglichst konstant ist. Mehr Informationen dazu in MISRA und ENGE [2001].

Antennentyp unterschiedlich und ist nicht fest mit der physikalischen Antenne verknüpft.

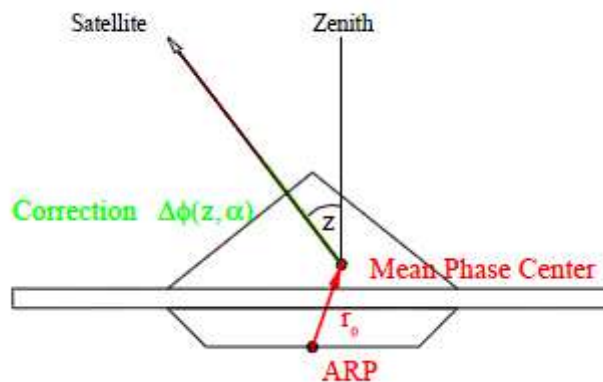


Abbildung 3-2: mittlere Antennenoffsets (PCO) und Phasenzentrumsvariationen (PCV), ARP: Antenna Reference Point; ROTHACHER UND ZEBHAUSER [2000]

Der „Phase Center Offset (PCO)“ bezeichnet einen konstanten Abstand zwischen dem elektrischen Phasenzentrum und dem geometrischen Bezugspunkt der Antenne. Außerdem zeigen die GNSS-Antennen elevations- und teilweise auch azimutabhängige Variationen des elektrischen Phasenzentrums, die als „Phase Center Variation (PCV)“ bezeichnet werden. Das Phasenzentrum variiert, je nachdem aus welcher Richtung das GNSS-Signal ankommt, (siehe Abbildung 3-2). All dies führt zu Abweichungen von einigen Zentimetern in der Positionsbestimmung. Deshalb sollte die Position des Phasenzentrums und dessen Variationen bei präzisen Positionierungsverfahren genau bekannt sein.

Eine Beschreibung der Variationen des Antennenphasenzentrums wird von ROTHACHER und ZEBHAUSER [2000] durch folgende Formel gegeben:

$$\Delta r_{ant} = r_0 + \Delta\Phi(z, \alpha) \cdot e_{z, \alpha} \quad (3-15)$$

- r_0 : Position des relativ mittleren Phasenzentrums
- $\Delta\Phi(z, \alpha)$: Elevations- (und azimut-) abhängige Phasenzentrumsvariationen gegenüber dem mittleren Phasenzentrum r_0
- $e_{z, \alpha}$: Einheitsvektor in Satellitenrichtung

Relative Positionierungsverfahren, wie sie in dieser Arbeit angewendet werden (doppelte Differenzenbildung), führen beim Antennenphasenzentrum zu zwei Arten von Fehlereinflüssen: Zum einen zeigen bei der Nutzung von verschiedenen Antennentypen bei den Stationen (Referenz und Rover) der Basislinie die unterschiedlichen Antennen verschiedene Variationen. Diese Tatsache verursacht Höhenfehler in der Größenordnung von etwa 10 cm. Zum anderen stellt das Antennenphasenzentrum bei der Verwendung identischer Antennen nur bei langen Basislinien ein Problem dar, da die Satelliten von den zwei Endpunkten einer Basislinie unter verschiedenen Elevationswinkeln betrachtet werden.

Idealerweise sollten relative GNSS-Messungen möglichst immer mit Antennen des gleichen Typs durchgeführt werden. Bei der Auswertung von GNSS-Messungen mit Antennen unterschiedlicher Typen sollten antennenspezifische Korrekturwerte für das Verhalten der Phasenzentren herangezogen werden.

Für die Ermittlung dieser Korrekturparameter kann entweder eine relative oder eine absolute Kalibrierung vorgenommen werden. In dieser Arbeit werden die Kalibriertabellen⁴⁰ des „International GNSS Service (IGS)“ sowie des National Geodetic Service (NGS, USA) verwendet, wobei die Korrekturwerte der Tabellen aus einer Kombination des relativen und des absoluten Verfahrens bestimmt wurden.

3.2.2.1 Korrektur des Antennenphasenzentrum-Offsets (PCO)

Die mittleren Offsets können besonders in der Höhenkomponente Größenordnungen von einigen Zentimetern erreichen. Das absolute mittlere Offset des Phasenzentrums kann für die horizontalen Komponenten durch die Messung in zwei Lagen bestimmt werden. Dazu muss eine kurze Basislinie für wenige Stunden mit zwei Antennen des gleichen Typs besetzt werden, wobei die Antennen gleich ausgerichtet sind. Anschließend wird eine Antenne um 180° gedreht und wiederum mit beiden Antennen mehrstündig die Galileo Satelliten beobachtet. Die Differenz der beiden gerechneten Vektoren zwischen Referenz- und Prüfantenne ergibt den doppelten horizontalen Offset des Phasenzentrums. Die vertikale Komponente kann auf diese Weise nicht absolut bestimmt werden. Eine entsprechende Drehung der Antenne würde das Phasenzentrum zum Boden ausrichten, dort können aber keine Satelliten beobachtet werden. Die Bestimmung des vertikalen Offsets gelingt im einfachsten Fall nur relativ zwischen zwei Antennen. Zum einen kann der Offset aus einem Vergleich zwischen der GPS-Lösung einer kurzen Basislinie und einem präzisen Nivellement der beiden Punkte abgeleitet werden. Zum anderen wird der Offset durch den Vergleich zweier Messungen mit getauschten Antennen bei gleicher Ausrichtung ermittelt. Der Differenzvektor zwischen dem Referenzpunkt und dem mittleren Phasenzentrum im lokalen geodätischen System ergibt:

$$\Delta \underline{x}_{PCO_E5} = \left(\Delta x_{PCO_E5} \quad \Delta y_{PCO_E5} \quad \Delta h_{PCO_E5} \right) \quad (3-16)$$

Diese Werte sind in den Kalibriertabellen enthalten. Die NGS empfiehlt jedoch nur noch absolute Kalibrierwerte zu nutzen.

3.2.2.2 Korrektur der Variationen des Antennenphasenzentrums (PCV)

Die Phasenzentrumsvariationen (PCV) verursachen Fehler von mehreren Millimetern bis zu etwa 2 cm. Der elevationsabhängige Phasenfehler soll nicht unberücksichtigt bleiben, weil dieser speziell bei der Modellierung der troposphärischen Laufzeitverzögerung zu systematischen Höhenfehlern führen kann, die mehrere Zentimeter erreichen können. Relative Bestimmungen der PCV werden im Allgemeinen mit Choke-Ring-Antennen⁴¹ als Referenz durchgeführt, da der

⁴⁰ Zur Dokumentation des Kalibriertabellenformats siehe MADER [1999].

⁴¹ Eine Choke-Ring-Antenne ist eine Rundstrahlantenne für hohe Frequenzen, siehe 3.2.4.2.3.

Multipath-Einfluss bei ihnen gering ist (siehe ROTHACHER et al. [1996]). Ist das individuelle PCV-Modell der Referenzantenne bekannt, können auch absolute Werte abgeleitet werden. Bei der Nutzung der Kalibriertabelle erfolgt die Berücksichtigung einer Korrektur als Funktion der Elevation durch stückweise lineare Terme, wobei die Stützpunkte in den Kalibriertabellen in 5°-Abständen angegeben werden.

3.2.3 Phasensprünge („Cycle Slips“)

Phasensprünge (Cycle Slips) sind plötzliche Sprünge einer spezifischen ganzzahligen Anzahl von Zyklen in den Trägerphasenmessungen. Cycle Slips entstehen beim Ausfall des Empfängers, bei (kurzzeitigen) Signalunterbrechungen durch Hindernisse, bei niedrigem Signal-zu-Rausch-Verhältnis, bei hoher Dynamik des Empfängers sowie bei raschen Signalvariationen aufgrund von starken Störungen in der Ionosphäre (z.B. Szintillationen), durch Multipath oder durch heftige Antennenbewegungen. Sofern die Phasenbeziehung zu mindestens vier Satelliten erhalten bleibt, lassen sich Cycle Slips bei der Datenvorverarbeitung einfach beseitigen. Andernfalls muss ein neuer Mehrdeutigkeitswert festgesetzt werden.

Leistungsfähige GNSS-Empfänger markieren Cycle Slips⁴² und erleichtern damit die Datenbearbeitung. Die Handhabung der Cycle-Slips besteht üblicherweise aus vier aufeinanderfolgenden Schritten (siehe DAI et al. [2009]):

- Cycle-Slip-Detektion: Überprüfung des Auftretens von Cycle-Slips
- Cycle-Slip-Bestimmung: Quantifizierung der Größe von Cycle-Slips
- Cycle-Slip-Validierung: Testen der korrekten Auflösung der Cycle-Slips
- Cycle-Slip-Beseitigung: Beseitigung der Cycle-Slips von der Trägerphasenmessung

Die Prozessierung der Cycle-Slips kann entweder im Stand-alone-Positionierungsmodus oder im relativen Positionierungsmodus (wie im hier verwendeten Ansatz) erfolgen. In jedem Fall kann die Cycle-Slip-Detektion und -Bestimmung weiter nach der Anzahl der verfügbaren Signale kategorisiert werden. Im Folgenden sind die am häufigsten verwendeten Methoden der Cycle-Slip-Detektion und -Bestimmung aufgelistet:

- Vergleich von Strecken- und Phasenmessungen
- Qualitätskontrolle
- Differenzenfilterung
- Phasenkombination
- Vergleich von Doppler- und Phasenmessungen
- Polynomiale Anpassung

Das Auftreten von Cycle-Slips ist zufällig, weswegen die Detektion von Zeit zu Zeit angewandt werden sollte. Für den Fall eines Galileo E5-Einfrequenz- Empfängers ist die Verwendung eines schnellen Algorithmus mit kleiner rechnerischer Belastung für

⁴² Der „Loss-of-lock-Indicator (LLI)“ markiert Beobachtungen mit einer Wellenlänge verschieden von derjenigen, die durch den Wellenlängenfaktor definiert ist: 0: OK oder, 1: Cycle Slip, 4: Antispoofing, Blank: nicht bekannt; siehe RINEX-Beschreibung, <http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/rinex212.txt>.

die Detektion zu empfehlen. Aus diesem Grund und in Anbetracht des hier in Rede stehenden Ansatzes der Einfrequenz-Positionierung eignet sich der Vergleich von Strecken- und Phasenmessungen zur Cycle-Slip-Detektion. Dieser Prozess findet während des in Abschnitt 2.5.1 bereits behandelten DGNSS-Schritts bei der CPC-Datenprozessierung statt. Die Differenz der Strecken- und Phasenmessungen für Galileo E5 lautet:

$$PR_{A,k}^i - \Phi_{A,k}^i = 2 \cdot \delta PR_{A, Ion, k}^i + \lambda_{E5} \cdot N_{A,k}^i \quad (3-17)$$

Diese Gleichung ist frei von Geometrie, Uhrfehlern und Troposphärenfehlern, enthält aber bei Verwendung von Einfrequenz-Daten noch die ionosphärische Laufzeitverzögerung in doppelter Stärke. Zu zwei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten ergeben sich dann die Größen:

$$\begin{aligned} & (PR_{A,k}^i - \Phi_{A,k}^i) - (PR_{A,k+1}^i - \Phi_{A,k+1}^i) = \\ & (2 \cdot \delta PR_{A, Ion, k}^i + \lambda_{E5} \cdot N_{A,k}^i) - (2 \cdot \delta PR_{A, Ion, k+1}^i + \lambda_{E5} \cdot N_{A,k+1}^i) \end{aligned} \quad (3-18)$$

Ist kein Phasensprung wird die Bedingung erfüllt:

$$(PR_{A,k}^i - \Phi_{A,k}^i) - (PR_{A,k+1}^i - \Phi_{A,k+1}^i) \approx 0 \quad (3-19)$$

Liegt ein Phasensprung vor, wird die Testgröße in Epoche $k+1$ verändert:

$$(PR_{A,k}^i - \Phi_{A,k}^i) - (PR_{A,k+1}^i - \Phi_{A,k+1}^i) \approx \lambda_{E5} \cdot \Delta N_A^i \quad (3-20)$$

Galileo E5-Codemessungen weisen ein sehr geringes Rauschniveau auf, dies erleichtert somit die Bestimmung von Phasensprüngen mittels der hier vorgestellten Methode. Nach der Cycle-Slip-Bestimmung wird die Validierung für die neu gebildete CPC-Beobachtungsgröße durchgeführt. Nachdem die Cycle-Slip-Werte festgelegt sind und die Validierungsphase erfolgreich verlaufen ist, kann die letzte Phase, nämlich die Cycle-Slip-Beseitigung, durch eine einfache mathematische Subtraktion realisiert werden.

3.2.4 Mehrwegeeffekte (Multipath)

Multipath ist ein Phänomen, bei dem das Satellitensignal durch Objekte in der Nähe des Empfängers reflektiert wird. Dies hat zur Folge, dass nicht nur das direkte Signal (das sog. „Line of Sight: LOS“-Signal) den Empfänger erreicht, sondern ein aus dem LOS-Signal und einem oder mehreren Mehrwegesignalen zusammengesetztes Signal empfangen wird (siehe IRSIGLER [2008]). Im schlimmsten Fall kann es vorkommen, dass das LOS-Signal vollständig blockiert wird und somit der Empfänger nur die Multipath-Komponenten verarbeiten kann.

Das reflektierte Signal durchläuft im Vergleich zum LOS-Signal eine längere Wegstrecke, wodurch sich bezüglich dieses Satelliten ein falscher Pseudostreckenwert ergibt, der die gemessene Position verfälscht (siehe Abbildung 3-3).

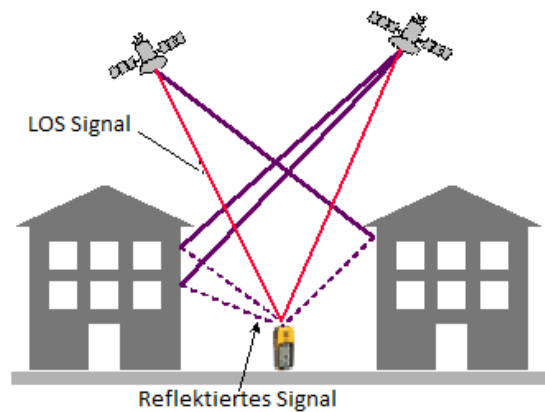


Abbildung 3-3: Multipath-Effekte; Quelle: <http://www.kowoma.de/gps/Fehlerquellen.htm>; letzter Aufruf 28.11.2012

Nach WILDT [2006] kommt es bei Multipath zu einer Beeinflussung der Signalpolarisation im Empfänger. Das Signal, das die Antenne erreicht und prozessiert wird, entsteht durch die Summe der Überlagerung des LOS-Signals mit den N indirekten Signalen und ergibt nach IRSIGLER [2008]:

$$S(t) = \underbrace{Ap(t - \tau_0) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)}_{\text{Direktes Signal(LOS)}} + \underbrace{A \sum_{k=1}^N \alpha_k p(t - \tau_0 - \tau_k) \cos[\omega_0 t + \varphi_0 + \Delta\Phi_{M,k} + (\Delta\omega_k - \Delta\omega_0)t]}_{N \text{ Multipath-Signale}} \quad (3-21)$$

Dabei beschreibt A die Amplitude des Signals, τ_0 die Verbreitungszeit des direkten Weges, φ_0 die Trägerphase und $\omega_0 = 2\pi f$ die Winkelgeschwindigkeit (f ist die Trägerfrequenz) inklusive der Dopplerverschiebung $\Delta\omega_0$ der direkten Signalkomponenten. P steht für Strecken- und Daten-Codes. Das Signal $S(t)$ enthält vier Multipath-Parameter:

- Die Multipath-relative Amplitude $A\alpha_k$, wobei α_k der Koeffizient der Reflexion ist, der die Signaldämpfung charakterisiert.
- Die Multipath-Laufzeitverzögerung τ_k [s] ist die Zeitverschiebung zwischen der direkten Signalkomponente und dem k^{th} Multipath-Signal. Sie kann auch metrisch angegeben werden.
- Die Multipath-relative Phase $\Delta\Phi_{M,k}$ beschreibt die Phasenverschiebungen zwischen dem direkten Signal und der k^{th} Multipath-Komponente.
- $\Delta\omega_k - \Delta\omega_0$ bezeichnet die Dopplerdifferenz zwischen dem direkten und dem k^{th} Multipath Signal.

Multipath tritt sowohl bei Codemessungen als auch bei Trägerphasenmessungen auf. Galileo E5 zeichnet sich bei Codestreckenmessungen durch einen sehr geringen Einfluss von Multipath im Vergleich zu anderen Signalen aus (siehe Abbildung 2-3). Im günstigsten Fall bewegt sich der E5-Code-Multipath-Fehler im Bereich von nur

wenigen Zentimetern, was gegenüber anderen Signalen sehr niedrig ist. Die AltBOC-Modulation ist ein wichtiger Faktor zur Reduzierung der Multipath-Effekte bei Codemessungen. Abbildung 3-4 zeigt die Umhüllung des Multipath-Fehlers mit einem Signal-zu-Rauschen-Verhältnis von 6 dB für verschiedene Modulationen, die bei Galileo-Signalen angewendet werden. Der Abbildung 3-4 ist zu entnehmen, dass die AltBOC-Modulation die beste Umhüllung des Multipath-Fehlers bietet:

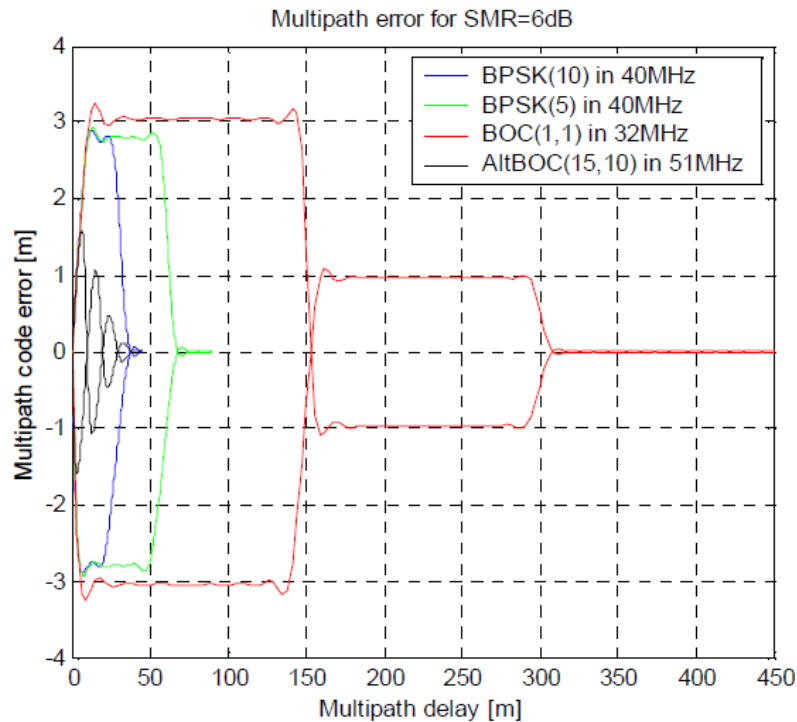


Abbildung 3-4: Vergleich von Code-Multipath-Fehlerumhüllungen für verschiedene Galileo-Modulationen mit einem C/N_0 von 6dB, SLEEWAEGEN et al. [2005]

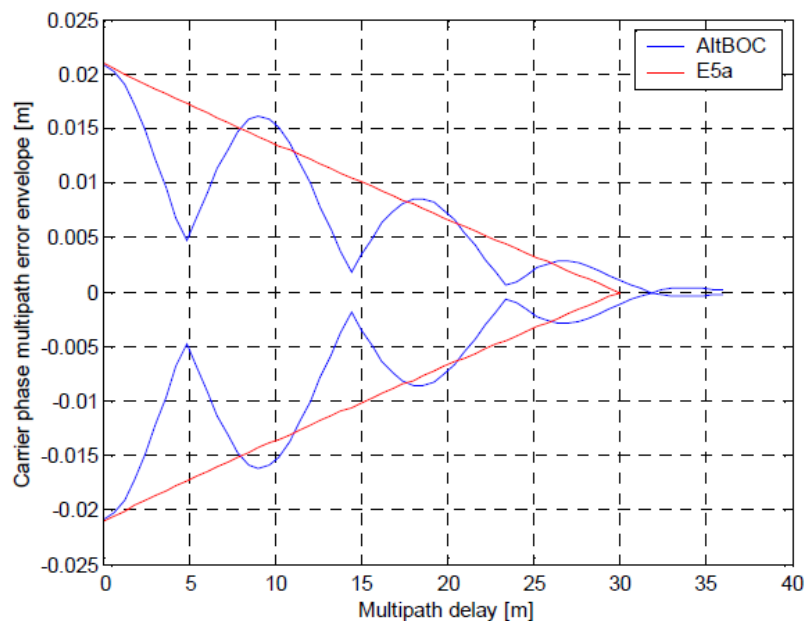


Abbildung 3-5: Trägerphasen-Multipath-Fehlerumhüllung für Galileo E5 AltBOC- und E5a BPSK(10)-Modulationen mit einem C/N_0 von 6dB, SLEEWAEGEN et al. [2008]

Multipath-Effekte beeinflussen die Genauigkeit der Trägerphasenmessungen zwar nur geringfügig. Dennoch muss der Effekt als ein wichtiges Genauigkeitsmerkmal bei der Beurteilung der Signalmodulation in Betracht gezogen werden. Abbildung 3-5 vergleicht die Trägerphasen-Mehrwegeausbreitung-Hüllkurve der AltBOC (15,10)-Modulation mit der BPSK (10)-Modulation (E5a). Es ist ersichtlich, dass die AltBOC-Modulation auch hier die Empfindlichkeit für Multipath reduziert. Allerdings ist die Verbesserung des Trägerphasen-Multipath durch die AltBOC-Modulation nicht so signifikant wie beim Code-Multipath. Der maximale Trägerphasen-Multipath-Fehler beträgt nur ca. $0,25\lambda$ (ein Viertel der Wellenlänge).

Im Gegensatz zu vielen anderen Fehlerquellen sind Multipath-Fehler in der Regel zwischen zwei benachbarten Empfängern (auch bei sehr kurzen Basislinien) unkorreliert und können somit nicht durch Differenzenbildung beseitigt werden. Deswegen ist der Multipath-Fehler bei den differenzierten CPC-Beobachtungsgrößen eine der verbleibenden Hauptfehlerquellen.

3.2.4.1 Multipath-Detektion

Die Detektion der von Multipath beeinflussten Messungen ist für die CPC-Beobachtungsgrößen von großer Bedeutung, um diese Fehler effizienter beseitigen zu können. Bei Einfrequenz-Messungen kann eine subtraktive Kombination von Codestrecken- und Trägerphasenmessungen („Code-Minus-Carrier: CMC“) den Fehler beseitigen:

$$MP_{E5,k}^i = PR_{E5,k}^i - \Phi_{E5,k}^i = 2 \cdot \delta PR_{Ion,E5,k}^i + \lambda_{E5} \cdot N_{E5}^i \quad (3-22)$$

Der Multipath-Fehler ist bei Trägerphasenmessungen erheblich geringer als bei Codestreckenmessung. Ein Vergleich des Code-Multipaths zu dem als quasi-wahr betrachteten Phasen-Multipath erlaubt mögliche Multipath –Einflüsse anzeigen, wenn man die Funktion zur Epoche k über eine gewisse Zeit hinweg bis zur Epoche $k+n$ beobachtet und systematische Schwankungen analysiert (siehe SCHÜLER [2006]).

3.2.4.2 Multipath-Mitigations-Techniken

In diesem Abschnitt werden einige Methoden zur Mitigation des Multipath-Einflusses vorgestellt. Es handelt sich dabei um eine Auswahl der am besten geeigneten Methoden für den Fall der Einfrequenz-Positionsbestimmung mit Galileo E5-Daten. Der Schwerpunkt liegt bei der Mitigation des Code-Multipaths. Der Phasen-Multipath beträgt nur ein paar Millimeter und dürfte nur einen unwesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Einfrequenz-Positionierungsergebnisse haben.

3.2.4.2.1 Code-Multipath-Mitigation durch Signalverarbeitung

Ein verbreiteter Ansatz, um den Code-Multipath zu reduzieren, ist die sog. „Narrow Correlation Technique“, die von NovAtel erstmalig auf GPS-Empfängern implementiert wurde und von VAN DIERENDOCK et al. [1992] beschrieben wurde. Anstelle der Verwendung eines Standard-Korrelators mit einem Chip-Abstand d von einem Chip zwischen den „Early-“ und „Late-Codes“ weist der Begriff "Narrow Correlation" normalerweise auf die Verwendung eines beliebigen Chip-Abstands von

d kleiner als 1 hin, IRSIGLER [2008]. Üblicherweise wird ein Chip-Abstand von $d=0,1$ verwendet. Der maximale Multipath-Fehler ist proportional zum Chip-Abstand d . Somit kann bei der Verwendung von $d=0,1$ der maximale Streckenfehler um den Faktor 10 im Vergleich zum normalen Korrelator ($d=1$) reduziert werden.

Eine andere Methode zur Minderung des Multipath-Einflusses ist die Nutzung des sogenannten „Double Delta ($\Delta\Delta$) Correlators“. Diese Methode nutzt einen Code-Diskriminator, der aus zwei Korrelatorenpaaren besteht. Der „Strobe Correlator“ von Ashtech, der „Pulse Aperture Correlator“ von NovAtel sowie die „Everest Technology“ von Trimble basieren auf dem „ $\Delta\Delta$ Correlation“-Konzept.

IRSIGLER [2008] vergleicht die verschiedenen Techniken und stellt dabei eine erhebliche Genauigkeitssteigerung von 83% im Falle des „Strobe Correlators“ sowie 93% im Falle der „Trimble Technology“ fest.

3.2.4.2.2 Phasenglättung

Durch die gleichzeitige Verarbeitung von Code- und Trägerphasenbeobachtungen können beide Messungen kombiniert werden, um "geglättete Pseudostrecken" zu erhalten. Dieser Ansatz nutzt die Tatsache, dass die Trägerphasenbeobachtungen im Vergleich zu den Code-Beobachtungen weniger durch Multipath beeinflusst werden und somit genauer sind. Der Code-Multipath kann durch Glättung mit Trägerphasenmessungen signifikant reduziert werden.

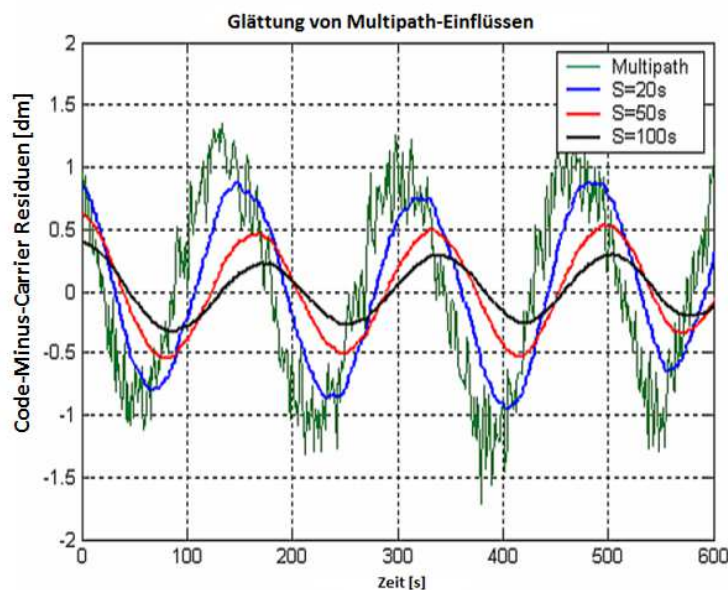


Abbildung 3-6: Glättung von Code-Multipath unter Nutzung verschiedener Zeitkonstanten (s)

Abbildung 3-6 zeigt die Ergebnisse eines Glättungsprozesses des Code-Multipath unter Nutzung von verschiedenen Zeitkonstanten (s). Es ist offensichtlich, dass die Multipath-Amplituden durch die Glättung merklich gemindert werden können. Die geglätteten Multipath-Einflüsse hängen von der Zeitkonstante s ab. Längere Zeitkonstanten führen in der Regel zu besseren Glättungsleistungen.

3.2.4.2.3 Antennendesign

Durch die Verwendung von speziellen Antennen kann verhindert werden, dass indirekte Signale unterhalb und leicht oberhalb des Antennenhorizonts empfangen

werden. Der Grund hierfür liegt darin, dass die reflektierten Signale sehr oft unter niedrigen Elevationswinkeln auf die Antenne treffen. Folgende Spezialanfertigungen von Antennen eignen sich für diese Aufgabe:

- „Choke-Ring“-Antenne: Hierbei handelt es sich um eine besondere Form von omnidirektionaler Antenne für den Einsatz bei hohen Frequenzen. Sie besteht aus einer Reihe von leitenden konzentrischen Zylindern um die zentrale GNSS-Antenne herum. Choke-Ring-Antennen zeichnen sich durch ihre Fähigkeit aus, Mehrwege-Signale von einer Quelle zu verwerfen. In der Theorie sind die entstehenden Fugen in der Lage, die primären und sekundären Wellen eines reflektierten Signals zu entfernen.
- „Phased Array“-Antenne: Dies ist eine phasengesteuerte Gruppenantenne mit starker Richtwirkung, die eine Bündelung der Strahlungsenergie durch die Anordnung und Verschaltung von Einzelstrahlern erreicht. Dieser Prozess wird auch „Beam Forming“ genannt und ermöglicht es der Antenne, einen Antennenstrahl zu schaffen, der genau in Richtung des Satelliten zeigt (Der Antennengewinn ist in dieser Richtung sehr groß). Andererseits können Null-Gewinne für weitere (unerwünschte) Richtungen generiert werden. Da Multipath-Signale üblicherweise aus unterschiedlichen Richtungen von den betreffenden Satelliten kommen, können sie effizient unterdrückt werden. Um die Bewegung der Satelliten zu berücksichtigen, können die Antennenstrahlen entsprechend gesteuert werden.

3.2.4.3 Stochastische Modellierung

Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) kann für die stochastische Modellierung eingesetzt werden, da die Multipath-Effekte zu Variationen des SNR führen (siehe WANNINGER et al [2000]). Wie bei SLEEWAEGEN [1997] gezeigt wurde, kann die Effizienz der Multipath-Mitigationsverfahren unter Ausnutzung der SNR-Daten verbessert werden. Zwischen den zuvor ermittelten CMC (3.2.4.1) und den Änderungen des SNR wird ein Umrechnungskoeffizient berechnet. Dieser Koeffizient hilft, die Multipath-Fehler aus dem SNR des Beobachtungstages zu berechnen.

Die Kovarianzmatrix für die doppelten Differenzen kann direkt unter Nutzung der SNR-Werte aufgestellt werden (siehe LAU und MOK [1999]). Dabei werden die auftretenden algebraischen Korrelationen herangezogen. Nach WANNINGER et al. [2000] können in Abhängigkeit von der Elevation ε des Satelliten Gewichte in das stochastische Modell eingeführt werden:

$$p_A^i = \sin^2 \varepsilon \quad (3-23)$$

Dies erlaubt die Dämpfung der Signale unter niedrigen Elevationen sowie des damit verbundenen höheren Rauschniveaus. Bekanntlich treten Multipath-Effekte insbesondere bei Satelliten mit niedriger Elevation auf. Das maximale Gewicht von 1 wird an Werte im Zenit zugeteilt, so dass dieser normierte Ansatz zur Kombination mit weiteren Teilmatrizen des stochastischen Modells bzw. der Gewichtsmatrix prinzipiell geeignet ist.

3.2.5 Relativistische Effekte

Relativistische Effekte beruhen auf der Relativitätstheorie⁴³, die sich mit der Struktur von Raum und Zeit sowie mit der Gravitation auseinandersetzt. Nach SEEBER [1989] liegen relativistische Effekte für die meisten Anwendungen der Satellitengeodäsie und somit auch für die Galileo-Einfrequenz-Positionierung innerhalb der Beobachtungsgenauigkeit. Durch die Bildung der doppelten Differenzen bei der präzisen Galileo-Einfrequenz-Positionierung und die Bildung der CPC-Beobachtungsgrößen dürften fast alle relativistischen Effekte beseitigt werden.

SCHÜLER [2006] beschreibt detailliert, welche relativistischen Fehler Einfluss auf die präzise GNSS-Positionierung haben könnten. Ein relativistischer Fehler, der jedoch noch nach der Bildung der doppelten Differenzen die Genauigkeit der Einfrequenz-Positionierung beeinträchtigen kann, ist der sogenannte „Radar Delay Effect“. WÜBBENA [1991] formuliert einen Ansatz zur Korrektur dieses Fehlers folgendermaßen:

$$\delta s_{A,RDE}^i = \frac{2 \cdot GM}{c^3} \cdot \ln \left(\frac{|\underline{X}^i| + |\underline{X}_A| + |\underline{X}^i - \underline{X}_A|}{|\underline{X}^i| + |\underline{X}_A| - |\underline{X}^i - \underline{X}_A|} \right) \quad (3-24)$$

GM : geozentrisches Gravitations-Massenprodukt ($3,986005 \cdot 10^{15} \text{ m}^3/\text{s}^2$ im WGS84)

\underline{X}^i : Satellitenposition im erdfesten System

\underline{X}_A : Stationskoordinaten

c : Lichtgeschwindigkeit

Im Allgemeinen ist eine stochastische Modellierung in diesem Fall nicht notwendig, da die funktionale Darstellung des Effektes hinreichend genau ist. Nach der doppelten Differenzenbildung hat dieser Effekt nur geringe Einflüsse und wirkt sich nur auf Basislinien länger als 100 km aus.

3.2.6 Modellierung der Koordinatenänderung (Bewegungskorrektur)

Die Koordinaten der Referenzstationen sind mit einem Bezugssystem (meistens ITRF⁴⁴) liiert, dessen Verankerung mindestens zwei tektonische Platten überspannt. Die Platten bewegen sich im Regelfall mit einer Amplitude von 1-10 cm pro Jahr relativ zueinander. Dadurch erfolgt eine ständige Änderung der Koordinaten der Stationen. Diese Bewegungen stellen eine erhebliche Beeinträchtigung für präzise GNSS-Anwendungen dar. Was die Genauigkeit der Galileo-Einfrequenz-Positionierung anbetrifft, wird die Signifikanzschwelle von wenigen Zentimetern überschritten.

⁴³ Die Relativitätstheorie: Es handelt sich um physikalische Theorien, die von Albert Einstein zunächst im Jahr 1905 mit der speziellen Relativitätstheorie und später im Jahr 1916 mit der allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben wurden. Die spezielle Relativitätstheorie beschreibt das Verhalten von Raum und Zeit aus der Sicht von Beobachtern, die sich relativ zueinander bewegen, und die damit verbundenen Phänomene.

⁴⁴ Das „International Terrestrial Reference Frame (ITRF)“ ist das international vereinbarte, erdfeste, weltweite Bezugssystem von terrestrischen kartesischen Koordinaten. Sein Ursprung ist das Geozentrum (Massenmittelpunkt der Erde), dessen Lage zur Erdoberfläche sich aus den Bahnen von künstlichen Erdsatelliten ergibt. Die Z-Achse ist die mittlere Rotationsachse der Erde, die X-Achse fällt in die 0-Meridianebene (Greenwich), die durch Koordinaten von Referenzstationen festgelegt ist. Die Y-Achse komplettiert das Dreibein des Rechtssystems.

Zur Verbesserung der Genauigkeit können näherungsweise Modelle definiert werden, die die tektonischen Plattenbewegungen ausgleichen. Eine gute Näherung der Plattenbewegungen erhält man über die Anwendung einer linearen Funktion zur Beschreibung der Bewegung. Eine weitere Näherungsmöglichkeit ist das Modell der „Starrkörperbewegung“, das zur Ableitung von Geschwindigkeitsvektoren für Neupunkte dient.

3.2.6.1 Lineares Bewegungsmodell

Dieses Modell beruht auf einem Geschwindigkeitsvektor, der als zeitlich invariant betrachtet wird. Es bietet eine gute Näherung, um Plattenbewegungen zu kompensieren. Streng genommen verlaufen die Bewegungen nicht linear, sondern stellen vielmehr Rotationen von Plattenfragmenten auf einer Kugel- bzw. Ellipsoid-Schale dar. Soweit die Bewegung in vergleichsweise kurzen Zeitintervallen betrachtet wird, erfüllt dieser lineare Ansatz seinen Zweck. Zur Beschreibung der Modellfunktion soll der Vektor \underline{x} die gegebenen Koordinaten für eine Referenzstation zur Referenzepoche t_{ref} enthalten und der Vektor \underline{v} der gültige Geschwindigkeitsvektor für das gewählte Bezugssystem sein. Für diesen Fall ergäbe der Positionsvektor \underline{x} zur Beobachtungsepoche t_{beob} im gleichen Bezugssystem:

$$\underline{x}(t_{beob}) = \underline{x}(t_{ref}) + \underline{v} \cdot (t_{beob} - t_{ref}) = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{t_{ref}} + \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \cdot (t_{beob} - t_{ref}) \quad (3-25)$$

Es existieren fertige Lösungen der linearen Plattenbewegungen für das ITRF-Bezugssystem, die tabellarisch in digitaler Form verfügbar sind. Sie geben Auskunft über eingetragene Referenzpunkte mit einem Koordinatentripel und dem zugehörigen Geschwindigkeitsvektor.

3.2.6.2 Starrkörperbewegungs-Modell

Eine neu gebaute Beobachtungsstation verfügt meist über keine Informationen über den Geschwindigkeitsvektor des Standorts. Deshalb müssen die ersten Werte mit geodynamischen Bewegungsmodellen oder geeigneten Interpolationsverfahren gewonnen werden. Hierfür kann das Modell der „Starrkörperbewegung“ verwendet werden. In diesem Modell werden die einzelnen Platten als starre Körper betrachtet, die auf der ozeanischen Kruste „schwimmen“. Die Voraussetzungen für diese Annahme sind, dass die Platten keine Deformationen aufweisen oder diese nicht signifikant sind. Gemäß dem Theorem von EULER lässt sich bei der Positionsveränderung eines starren Flächenstücks auf der Oberfläche einer Kugel diese Lageänderung als eine Rotation um eine Achse durch den Mittelpunkt der Kugel auffassen. Die Schnittpunkte dieser Achse mit der Kugeloberfläche sind die Rotationspole. Zur Beschreibung des Rotationsvektors dienen drei Parameter: Zwei Richtungsparameter (z.B. die geographischen Koordinaten des Schnittpunktes φ und λ mit der Kugeloberfläche) sowie der zugehörige Drehwinkel bzw. die Rotationsgeschwindigkeit ω (Vorzeichenkonvention: positiv bei Rotation im Uhrzeigersinn, gesehen vom Mittelpunkt der Kugel aus).

Die Punkte der rotierenden Platte bewegen sich auf Kleinkreisen um den Rotationspol. Dadurch ist jeder Rand der Platte, der nicht parallel zu einem solchen Kleinkreis ist, entweder „produktiv“ oder „destruktiv“. Der Zusammenhang zwischen der Bewegung eines Punktes auf der Platte und dem Rotationsvektor dieser Platte wird aus der nächsten Formel ersichtlich:

$$\frac{dR}{dt} = \underline{v}_{AB} = \underline{\Omega}_{AB} \times \underline{R} \Rightarrow \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_y \cdot z_k - \omega_z \cdot z_y \\ \omega_z \cdot x_k - \omega_x \cdot z_k \\ \omega_x \cdot y_k - \omega_y \cdot x_k \end{pmatrix} \quad (3-26)$$

\underline{v}_{AB} : Geschwindigkeitsvektor eines Punktes auf der Platte B relativ zu einem Punkt auf der Platte A

$\underline{\Omega}_{AB}$: Rotationsvektor der Platte B relativ zu A

R : Radius oder Ortsvektor vom Mittelpunkt der Erde zum betreffenden Aufpunkt

$v_{x,y,z}$: Geschwindigkeitskomponente des Punktes

$\omega_{x,y,z}$: Winkelgeschwindigkeit

Damit kann die Bewegung eines Punktes über die Integration nach der Zeit bestimmt werden.

3.2.7 Gezeiten der festen Erde

Die Gezeiten der Erde werden durch die Gravitation (Anziehungskraft) v.a. des Mondes (vernachlässigbar bei anderen Himmelskörpern) verursacht. Diese Anziehungskraft bewirkt eine Deformation der Erdkruste. Die Wirkung des Mondes ist etwa doppelt so groß wie diejenige der Sonne. Nach KOUBA et al. [2001] werden die durch Gezeiten verursachten periodischen vertikalen und horizontalen Stationsverschiebungen durch Kugelflächenfunktionen von Grad und Ordnung (n, m) mit der „Love“-Zahl $h_{n,m}$ und der „Shida“-Zahl $l_{n,m}$ gekennzeichnet. Die effektiven Werte dieser Zahlen sind mehr oder weniger abhängig von den Stationsbreiten und der Gezeiten-Frequenz (siehe WAHR [1981]). Nach dem IERS⁴⁵ [1989] wird der Verschiebungsvektor $\Delta r = |\Delta x, \Delta y, \Delta z|$ wie folgt berechnet:

$$\Delta r = \sum_{j=2}^3 \left(\frac{GM_j}{GM} \cdot \frac{r^4}{r_j^4} \left\{ \left[3 \cdot l_2 (\hat{R}_j \cdot \hat{r}) \right] \hat{R}_j + \left[3 \cdot \left(\frac{h_2}{2} - l_2 \right) (\hat{R}_j \cdot \hat{r})^2 - \frac{h_2}{2} \right] \hat{r} \right\} + \left[-0.025m \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi \cdot \sin(\theta_g + \lambda) \right] \cdot \hat{r} \right) \quad (3-27)$$

⁴⁵ IERS: „International Earth Rotation Service“

Dabei stellen GM und GM_j die Gravitationsparameter der Erde, des Mondes ($j=2$) und der Sonne ($j=3$) dar. r und r_j sind die geozentrischen Zustandsvektoren der Station, des Mondes und der Sonne mit den entsprechenden Einheitsvektoren \hat{r} und \hat{R}_j . h_2 und l_2 sind die dimensionslosen „Love“- und „Shida“-Zahlen 2. Ordnung (0.609, 0.085). ϕ und λ bezeichnen die Breite und Länge der Station und θ_g meint die sogenannte „Greenwich Mean Sideral Time“ (Sternzeit).

Die Amplituden der Gezeiten der festen Erde erreichen Werte im Dezimeter-Bereich. Beispielsweise verursacht der Mond eine Deformation der Erdkruste von etwa 30 cm. Der periodische Teil der Gezeiten kann bei statischer Positionierung über einen Zeitraum von 24 Stunden durch Bildung des Mittelwerts weitgehend entfernt werden. Es ist auch zu beachten, dass bei differentieller Positionierung über kurze Basislinien (<100 km) beide Stationen nahezu identische Gezeitenverschiebungen aufweisen, so dass diese sich weitgehend gegenseitig aufheben. Die für die spätere Prozessierung der E5-Daten verwendete Korrektur ist eine Erweiterung des IERS-Algorithmus und weist eine Genauigkeit von wenigen Millimetern auf. Da diese Genauigkeit die erwartete Genauigkeit der Galileo-Einfrequenz-Positionierung um mehrere Ordnungen übersteigt, ist eine stochastische Modellierung nicht notwendig.

3.2.8 Ozeanische Auflasten

Kontinuierliche GNSS-Beobachtungsstationen, insbesondere in küstennahen Bereichen, unterliegen Bewegungen aufgrund der Belastung der Lithosphäre⁴⁶ durch ozeanische Auflasten. Ozeanische Auflasten sind in ihren Eigenschaften vergleichbar mit den Gezeiten der festen Erde, jedoch fast um eine Größenordnung kleiner als die letzteren. Die durch sie verursachten Deformationen erreichen lediglich einige Zentimeter. Ozeanische Auflasten sind eher lokale Phänomene und verfügen per Konvention über keinen festen Bestandteil. Für die präzise Positionierung besonders im küstennahen Bereich muss eine Korrektur der Auflasten vorgenommen werden. Die ozeanischen Auflasten können in jeder Hauptrichtung mit folgenden Korrekturtermen modelliert werden (siehe IERS [1996]):

$$\Delta \underline{x}_{OA} = \begin{pmatrix} -\Delta x_3 \\ -\Delta x_2 \\ -\Delta x_1 \end{pmatrix} \wedge \Delta x_c = \sum_j f_j \cdot a_{c,j} \cdot \cos(\omega_j \cdot t + \chi_j + u_j - \phi_{c,j}) \quad (3-28)$$

$\wedge c = 1,2,3$

Dabei sind f Skalierungsfaktoren und u Phasenkorrekturen für die Partialtiden. Die Summation j repräsentiert die 11 Tiden ($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, M_f, M_m$ und S_{sa}). $a_{c,j}$ bezeichnet die Amplitude der Partialtiden j für die Koordinatenkomponente c . ϕ ist der Phasenwinkel und t das Zeitargument. ω steht für die Kreisfrequenz. χ ist das astronomische Argument für die Partialtiden j .

⁴⁶ Die Lithosphäre umfasst die Erdkruste und Teile des oberen Erdmantels und bildet eine Schicht von etwa 100 km Mächtigkeit.

Die Chalmers Universität (in Schweden) hat einen Dienst eingerichtet, der die Auflastkoeffizienten in Form von Amplituden und Phasenverschiebungen zur Verfügung stellt⁴⁷.

3.2.9 Erdrotations-Parameter

Die Erde ist ein dynamisches System (Einwirkung von Gravitationskräften und anderer Phänomene), wodurch sich die Rotation der Erde verändert. Die Erdrotations-Parameter (ERP) (*Polposition* X_p , Y_p und $UT1-UTC$) erleichtern die genauere Transformation zwischen den terrestrischen und inertialen Koordinatensystemen, die für GNSS-Analysen erforderlich sind, IERS [1996].

KOUBA und HERAUX [2001] weisen darauf hin, dass die ERP des IERS bzw. IGS die täglichen bzw. subtäglichen Schwankungen in der Erdrotation nicht einbeziehen. Bei der statischen präzisen Einfrequenz-Positionierung müssen die kompletten ERP, sprich, die herkömmlichen ERP plus das subtägliche ERP-Modell, zur Erzielung optimaler Positionsergebnisse über ein kürzeres Intervall als 24 Stunden eingesetzt werden. Der folgende funktionale Zusammenhang ermöglicht es, die kompletten ERP als Korrekturen (ΔX , ΔY , ΔZ) in die herkömmlichen (ITRF) Stationskoordinaten (X , Y , Z) einzuführen

$$\Delta \underline{X} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y \cdot \delta UT_1 + Z \cdot \delta X_p \\ -X \cdot \delta UT_1 - Z \cdot \delta Y_p \\ -X \cdot \delta UT_1 + Y \cdot \delta Y_p \end{pmatrix} \quad (3-29)$$

Dabei wird jede der subtäglichen ERP-Korrekturen (δX_p , δY_p , δUT_1) aus der folgenden Gleichung für z.B. die X_p Pol-Komponente abgeleitet:

$$\Delta X_p = \sum_{j=1}^8 F_j \cdot \sin \xi_j + G_j \cdot \cos \xi_j \quad (3-30)$$

Hierbei ist ξ_j das astronomische Argument bei der aktuellen Epoche der Summation j der acht täglichen Gezeitenwellen (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1), ergänzt mit $n \cdot \pi / 2$ ($n = 0, 1$ oder -1). F_j und G_j repräsentieren die Gezeitenwellenkoeffizienten, die aus den neuesten globalen Ozeangezeitenmodellen für jede der drei ERP-Komponenten berechnet werden.

3.2.10 Satellitenbahnfehler

Die Galileo-Satelliten fliegen nur näherungsweise auf sehr präzisen Umlaufbahnen (Keplerellipse). Es wirken verschiedene Störbeschleunigungen⁴⁸ auf die Satelliten, die zu Bahnabweichungen führen. Die Genauigkeit der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung hängt auch maßgeblich von der Genauigkeit der Orbitdaten ab. Zum

⁴⁷ siehe <http://frost.e.oso.chalmers.se/loading/>; letzter Aufruf 29.11.2012

⁴⁸ Schwankungen der Bahn durch Schwerebeschleunigung der Erde, Beschleunigungen infolge des Luftdrucks der Atmosphäre, des Solarstrahldrucks und durch die Anziehung von Sonne und Mond (sowie anderen Planeten) beeinflussen die Satellitenbahnen.

jetzigen Zeitpunkt werden Galileo-Orbitdaten nur von einigen GNSS-Rechenzentren⁴⁹ zur Verfügung gestellt. Dies liegt u.a. an der zurzeit geringen Anzahl von Galileo-Satelliten im All. Mit der kontinuierlichen Steigerung der Anzahl der Galileo-IOC-Satelliten dürfte auch bald das IGS Galileo-Orbitdaten zur Verfügung stellen.

Die Galileo-Orbitdaten (zurzeit nur im Rahmen des MGEX⁵⁰-Projekts generiert), die für die Prozessierung der Einfrequenz-Daten verwendet werden können, werden identisch eingeteilt wie die aktuellen GNSS-Orbitdaten (siehe Tabelle 3-2). Dabei werden die sog. „Broadcast-Ephemeriden“ als zusätzliche Informationen auf den Trägerwellen des Galileo E5-Signals aufmodelliert und in Form von Navigationsnachrichten gesendet. Die übrigen Orbitprodukte werden je nach ihrer Genauigkeit zu verschiedenen späteren Zeitpunkten als SP3-Orbitdaten zur Verfügung gestellt.

Art	Genauigkeit	Verfügbarkeit
Broadcast Orbit	0.5-5 m	Echtzeit
Ultra-rapid (predicted part) Orbit	50 cm	3-9 h
Ultra-rapid (observed part) Orbit	30 cm	3-9 h
Rapid Orbit	10 cm	17-41h
Final Orbit	3-5 cm	12-18 Tage

Tabelle 3-2: Genauigkeit und Verfügbarkeit der Orbitprodukte

Die Größenordnung der Bahnfehler der Satelliten unterscheidet sich je nach Orbit-Datentyp. Bei der relativen Positionierung kann der Einfluss des Bahnfehlers mit der folgenden, einfachen Formel abgeschätzt werden (siehe BAUERSIMA [1983]):

$$\Delta r \approx \frac{l}{\rho} \cdot \Delta R \quad (3-31)$$

Wobei Δr den resultierenden Fehler in den Komponenten der Basislinie angibt, l die Basislinienlänge, ρ die Entfernung zwischen Satelliten und Empfängerantenne und ΔR den Satellitenbahnfehler.

Folgende Bahnfehler resultieren aus Berechnungen mit der obigen Formel in Abhängigkeit der Basislinienlänge (siehe Tabelle 3-3). Anhand der Tabelle 3-3 wird verdeutlicht, dass der Orbitfehler für die Bestimmung von Positionen über Basislinien bis zu 100 km vernachlässigt werden kann. Da die CPC-Methode eine Positionsbestimmung über lange Basislinien mit den Galileo E5-Einfrequenz-Daten

⁴⁹ Galileo-Orbitdaten werden im Rahmen eines Projektes des BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) generiert: <http://igs.bkg.bund.de/file/browse>. Die Daten können über NTRIP heruntergeladen werden.

⁵⁰ MGEX: („Multi GNSS Experiment“) ist ein Forschungsprojekt von verschiedenen wissenschaftlichen Instituten mit dem Zweck der Bereitstellung multipler GNSS-Orbitdaten (Galileo, GLONASS und GPS).

ermöglichen soll, ist eine Schätzung des verbleibenden Orbitfehlers im Beobachtungsraum der doppelten Differenzen notwendig. In den vom IGS bereitgestellten SP3-Orbitdateien sind Genauigkeitsabschätzungen der Satellitenpositionen vorhanden, diese Angaben beinhalten jedoch keinerlei Aussage über etwaige vorhandene Korrelationen.

Bahnfehler	Basislinienlänge	Fehler in der Basislinie
2.5 m	10 km	1 mm
2.5 m	100 km	11 mm
2.5 m	1000 km	110 mm
0.5m	100 km	2 mm
0.5 m	1000 km	22 mm
0.1 m	1000 km	4 mm
0.05 m	1000 km	2 mm

Tabelle 3-3: Einfluss der Qualität der Galileo-Satellitenbahnen auf die zu bestimmenden Stationskoordinaten

Somit sind die stochastischen Informationen zur Modellierung unvollständig. Die Kovarianzmatrix der Satellitenpositionen lässt sich damit nur als Diagonalmatrix approximieren:

$$\underline{\Sigma}_{XYZ,SAT} = \begin{bmatrix} \sigma_i^2 & & & & \\ & \sigma_i^2 & & & \\ & & \sigma_i^2 & & \\ & & & \sigma_i^2 & \\ & & & & \ddots \end{bmatrix} \wedge \sigma_{X,i} = \sigma_{Y,i} = \sigma_{Z,i} = \sigma_i \quad (3-32)$$

Mit der Hilfe der Funktionalmatrix

$$\underline{F} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla \Delta CPC_{AB}^{ij}}{\partial X_i} & \frac{\partial \nabla \Delta CPC_{AB}^{ij}}{\partial Y_i} & \frac{\partial \nabla \Delta CPC_{AB}^{ij}}{\partial Z_i} & \frac{\partial \nabla \Delta CPC_{AB}^{ij}}{\partial X_j} & \dots \\ \frac{\partial \nabla \Delta CPC_{AB}^{ik}}{\partial X_i} & \frac{\partial \nabla \Delta CPC_{AB}^{ik}}{\partial Y_i} & \frac{\partial \nabla \Delta CPC_{AB}^{ik}}{\partial Z_i} & & \frac{\partial \nabla \Delta CPC_{AB}^{ij}}{\partial X_k} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & \dots \end{bmatrix} \quad (3-33)$$

wird die Kovarianzmatrix im Beobachtungsraum transformiert:

$$\underline{\Sigma}_{\nabla \Delta CPC,SAT} = \underline{F} \cdot \underline{\Sigma}_{XYZ,SAT} \cdot \underline{F}^T \quad (3-34)$$

Aufgrund der unzureichenden Eingangsdaten beschreibt die stochastische Modellierung die Realität nur bedingt vollständig. Jedoch erlaubt es der funktionale Zusammenhang, Messungen nahe der Referenzstation mit geringeren Standardabweichungen zu versehen (also mit hohen Gewichten) und Messungen über entfernte Stationen entsprechend weniger zu gewichten.

3.2.11 Atmosphärische Resteffekte

Nach der erfolgreichen Beseitigung des Ionosphärenfehlers durch die CPC-Kombination bedingt die troposphärische Refraktion als einziger verbleibender atmosphärischer Fehler eine Minderung der Genauigkeiten der Galileo Einfrequenz-Positionierung vor allem über lange Basislinien.

3.2.11.1 Die troposphärische Laufzeitverzögerung

Nach der Einteilung der Erdatmosphäre nach der Temperatur lässt sich die untere Schicht von etwa 0 bis 10 km Höhe als Troposphäre bezeichnen (siehe Tabelle 3-4). In der Troposphäre spielt sich das gesamte Wettergeschehen ab.

Die Troposphäre wird durch einen nahezu linearen Temperaturverlauf⁵¹ charakterisiert. Fast der gesamte Wasserdampf der Erdatmosphäre befindet sich in der Troposphäre und trägt somit erheblich zur Gesamtmasse der Atmosphäre (80 % der Masse) bei. Die Troposphäre ist praktisch ein neutrales Gas, da elektrisch geladene Teilchen hier keine Rolle spielen. Elektromagnetische Wellen werden im gesamten Radiofrequenz-Bereich von der Troposphäre beeinflusst. Sie ist jedoch kein dispersives Medium, weswegen ihr Brechungsindex nicht von der Frequenz abhängig ist. Die Brechung in der Troposphäre kann als Funktion physikalischer Parameter wie Luftdruck und Temperatur, die mit der Höhe kontinuierlich abnehmen, und des Wasserdampfdrucks beschrieben werden.

Höhe	Temperatur	Ionisation	Gaszusammensetzung
über 60000 km	Interplanetarischer Raum		
über 1000 km	Thermopause Thermosphäre	Protosphäre (Exosphäre)	Heterosphäre
etwa 80 km	Mesopause Mesosphäre	Ionosphäre	
etwa 50 km	Stratopause Stratosphäre	Neutrosphäre	Homosphäre
etwa 10 km	Troposphäre		
0 km	Erdboden		

Tabelle 3-4: Aufbau der Erdatmosphäre, BAUER [1994]

Die troposphärische Laufzeitverzögerung wird in der Fachliteratur häufig auch als „neutrale Laufzeitverzögerung (engl. Zenith Neutral Delay, ZND)“ bezeichnet. Das ZND umfasst auch die Laufzeitverzögerung in der Stratosphäre. Diese Verzögerung kann in zwei Komponenten unterteilt werden und zwar in einen feuchten und in einen hydrostatischen Anteil. Die hydrostatische Komponente wird in Zenith-Richtung „ZHD, Zenith Hydrostatic Delay“ genannt, ist sehr gut modellierbar und kann durch

⁵¹ In der Troposphäre nimmt die Temperatur mit der Höhe durchschnittlich 6,5° C/km ab.

Oberflächenmessungen bestimmt werden. Die feuchte Komponente, die sogenannte „ZWD, Zenith Wet Delay“ ist aufgrund der irregulären Wasserdampfverteilung in der Atmosphäre nur sehr schlecht modellierbar. Der Wasserdampfgehalt hängt davon ab, wieviel Wasser in der Luft gebunden werden kann, was wiederum von der Temperatur der Luft bestimmt wird – wenn die Luft warm ist, befindet sich in ihr mehr Wasserdampf. Zusätzlich variiert die Temperatur räumlich und zeitlich. Diese Fakten erschweren eine genaue Modellierung der ZWD.

Der durch die troposphärische Refraktion verursachte Fehler des Satelliten i gemessen an der Station A kann so approximiert werden:

$$\begin{aligned} \delta T = & m(\varepsilon_A^i)_{HYD} \cdot ZHD + m(\varepsilon_A^i)_{HYD,ASYM} \cdot [G_N \cdot \cos(\alpha_A^i) + G_E \cdot \sin(\alpha_A^i)] \\ & + m(\varepsilon_A^i)_{WET} \cdot ZWD + m(\varepsilon_A^i)_{WET,ASYM} \cdot [G_N \cdot \cos(\alpha_A^i) + G_E \cdot \sin(\alpha_A^i)] \end{aligned} \quad (3-35)$$

$m(\varepsilon)_{HYD}$: Mapping-Funktion für den hydrostatischen Anteil

ZHD : „Zenith Hydrostatic Delay“

$m(\varepsilon)_{WET}$: Mapping-Funktion für den feuchten Anteil

ZWD : „Zenith Wet Delay“

$m(\varepsilon_A^i)_{ASYM}$: Mapping-Funktion für die azimutalen Asymmetrien

G_N : Gradient in Nordrichtung

G_E : Gradient in Ostrichtung

α : Azimut

ε : Elevationswinkel,

Dabei können die azimutalen Asymmetrien $m(\varepsilon_A^i)_{ASYM}$ durch horizontale Gradientenmodelle bestimmt werden. Sie sind jedoch meist nicht signifikant. Aufgrund dessen werden im Folgenden nur noch der hydrostatische und der feuchte Anteil des troposphärischen Fehlers betrachtet:

$$\delta T = m(\varepsilon)_{HYD} \cdot ZHD + m(\varepsilon)_{WET} \cdot ZWD \quad (3-36)$$

Direkte Messungen der Brechungszahlen entlang des Ausbreitungsweges sind schwer realisierbar, wobei Messungen der feuchten Komponente entlang des Signalweges mit einem Wasserdampfadiometer möglich wären. Deswegen wurde eine Vielzahl von Modellen entwickelt, mit deren Hilfe die Höhenabhängigkeit der Brechungszahlen beschrieben werden kann. Die troposphärische Verzögerung nimmt mit wachsender Zenitdistanz zu, da die Signale einen immer längeren Weg durch die Troposphäre zurücklegen müssen. Somit ist die Signalbrechung und folglich der Fehler größer, je kleiner der Elevationswinkel ist. Die nächste Tabelle illustriert den durchschnittlichen Einfluss der troposphärischen Refraktion auf die gemessene Entfernung in Abhängigkeit der Elevationswinkel.

Für Galileo E5-Einfrequenz-Messungen werden dieselben Größenordnungen wie in der Tabelle 3-5 erwartet. Darüber hinaus kann festgehalten werden, dass der Troposphärenfehler aufgrund der ähnlichen lokalen atmosphärischen Gegebenheiten über kurze Basislinien (<10 km) durch die doppelten Differenzen eliminiert werden kann.

Elevation	90°	20°	15°	10°	5°
δT_{ZHD}	2.31 m	6.71 m	8.81 m	12.90 m	23.61 m
δT_{ZWD}	0.20 m	0.58 m	0.77 m	1.14 m	2.21 m
δT	2.51 m	7.29 m	9.58 m	14.04 m	25.82 m

Tabelle 3-5: Einfluss der troposphärischen Refraktion auf die gemessene Entfernung, SEEBER [1989]

3.2.11.1.1 Bestimmung der hydrostatischen Komponente

Die hydrostatische Komponente (ZHD) der neutralen Laufzeitverzögerung wird unter Zuhilfenahme der Berechnung des neutralen Luftrefraktionsindex N

$$N = k_1 \cdot \frac{R_0 \cdot p}{M_T} + k_2 \cdot \frac{e}{T} \cdot Z_F^{-1} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \cdot Z_F^{-1} \quad (3-37)$$

N : Reduzierter Index der troposphärischen Refraktion

$k_{1..3}$: Refraktionskonstante, $k_1 = 77.60 K / hPa$; $k_2 = 22.1 K / hPa$; $k_3 = 370100 K^2 / hPa$

Z_F : Kompressibilität der feuchten Luft, $Z_F \approx 1,0$

R_0 : Universelle Gas-Konstante, $R_0 = 8.31434 J / (mol \cdot K)$

M_T : Molmasse der trockenen Luft, $M_T : 28.9644 kg / kmol$

p : Luftdruck

folgendermaßen ermittelt:

$$ZHD_A^{z=0} = 10^{-6} \cdot \int_{h_A}^{\infty} k_1 \cdot \frac{R_0 \cdot p}{M_T} \cdot dh = 10^{-6} \cdot k_1 \cdot R_T \cdot \int_{h_A}^{\infty} p \cdot dh \quad (3-38)$$

z : Zenitrichtung, $z=0$

h : ellipsoidische Höhe des Fußpunktes oder der Antenne

R_T : Spezifische Gaskonstante der trockenen Luft, $R_T = R_0 / M_T$

Bei der Annahme eines hydrostatischen Gleichgewichts kann die Integration ausgelassen werden. Dies setzt die Kenntnis des Bodendrucks voraus, der gemessen werden kann. Grundlegende Arbeiten zur Modellierung der Troposphäre wurden von HOPFIELD [1969 und 1971] durchgeführt. Das Modell nach HOPFIELD berechnet den hydrostatischen Fehler durch:

$$ZHD = \left(0.0023081 \left[\frac{m}{hPa} \right] - 0.0075562 \left[\frac{m \cdot K}{hPa} \right] \cdot \frac{1}{T_A} \right) \cdot p_A \quad (3-39)$$

T_A : Oberflächentemperatur oder Temperatur auf Höhe der Antenne

p_A : Luftdruck an der Erdoberfläche oder auf Höhe der Antenne

Damit wird mit Hilfe der beiden Parameter Temperatur und Luftdruck der hydrostatische Fehler ermittelt. Das Modell weist jedoch eine Genauigkeitsbeschränkung auf, da es die Annahme einer konstanten Gravitationsbeschleunigung voraussetzt. Das Modell von SAASTAMOINEN berücksichtigt dagegen die Änderung der Gravitationsbeschleunigung mit der Höhe (siehe SEEBER [1989]). Dies führt zu besseren Ergebnissen bei der Höhenbestimmung.

Die hydrostatische Komponente des Fehlers des SAASTAMOINEN-Modells wird nun folgendermaßen berechnet:

$$ZHD = \frac{0.0022767 \left[\frac{m}{hPa} \right] \cdot p_A}{1 - 0.00266 \cdot \cos(2 \cdot \varphi_A) - 0.00028 \left[\frac{1}{km} \right] \cdot h_A} \quad (3-40)$$

φ : ellipsoidische Breite

Damit wird die Schwereabnahme zu den Polen als Funktion der geographischen Breite der Antenne A und ihrer ellipsoidischen Höhe h im Nenner der Gleichung einbezogen. Diese Gleichung erlaubt es, den hydrostatischen ZHD-Term bis auf wenige Millimeter genau zu bestimmen.

3.2.11.1.2 Feuchte Komponente

Die feuchte Komponente macht ca. 10 % des gesamten Troposphärenfehlers aus. Sie ist, wie bereits gesagt wurde, im Gegensatz zur hydrostatischen Komponente nur schwer modellierbar. Für die Bestimmung des ZWD werden meteorologische Daten verwendet. Die Daten stammen dabei entweder aus Messungen an der Station oder werden mit Hilfe von Wettermodellen (siehe 3.2.11.2.2) berechnet. Leider entsprechen die Wettermodelle meist nicht den realen Bedingungen. Sie befassen sich oft nicht mit täglichen und saisonalen Variationen der Troposphäre. Die Problematik ist, dass die gemessenen meteorologischen Daten oft zu ungenau sind und die gesamte Troposphäre oberhalb der Station nicht repräsentieren können. Dennoch kann annäherungsweise der ZWD wie folgt ausgedrückt werden:

$$ZWD_A^{z=0} = 10^{-6} \cdot \int_{h_A}^{\infty} \left(k_2' \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \right) \cdot Z_F^{-1} \cdot dh \quad (3-41)$$

Das Integral verursacht dabei einige Unstimmigkeiten aufgrund der genannten Ungenauigkeiten in den Bodenmodellen.

3.2.11.2 Modelle für die troposphärische Laufzeitverzögerung

Die Erhöhung der Genauigkeit der Galileo E5-CPC-Einfrequenz-Positionierung über lange Basislinien (>10 Km) erfordert unabdingbar die Korrektur der troposphärischen Laufzeitverzögerung. Bei der relativen Positionierung verursachen die Troposphäreneffekte in der Höhenkomponente Fehler von einigen Zentimetern. Bei großen Höhenunterschieden zwischen den Stationen wirkt sich die Troposphäre noch stärker auf die Höhenergebnisse aus.

Durch die Verwendung geeigneter Troposphärenmodelle kann der Fehler zu rund 90 % korrigiert werden. Um die totale troposphärische Laufzeitverzögerung, die auch als die sog. „Zenith Path Delay“ (ZPD=ZHD+ZWD) bezeichnet wird, zu berechnen, nutzen die meisten präzisen GNSS-Applikationen Modelle, die aus klimatologischen Parametern abgeleitet werden. Jedoch können die ZPD-Werte an einem Standort schnell mit den wechselnden Wetterbedingungen schwanken.

Die Abbildung 3-7 zeigt die Eigenschaften des ZPD aus klimatologischen Parametern über verschiedene Zeitskalen. Ein saisonaler Trend kann mit einer Tendenz zu niedrigeren ZPD-Werten im Winter (Abbildung 3-7, oben) beobachtet werden. Auch über einen Zeitraum von 14 Tagen (Abbildung 3-7, unten) können schnelle Änderungen der ZPD-Werte innerhalb von wenigen Stunden geschehen und langsamere Veränderungen im Laufe von wenigen Tagen beobachtet werden.

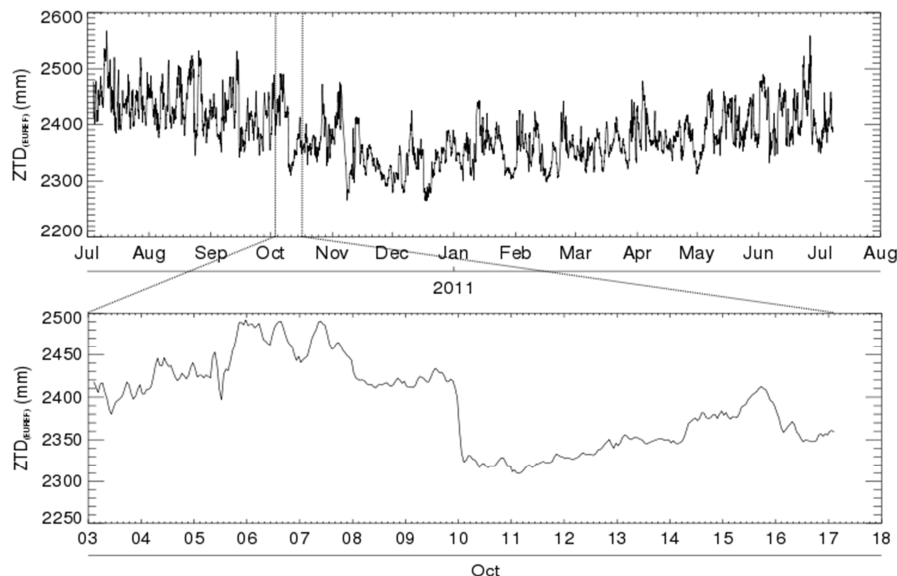


Abbildung 3-7: Zeitreihen von ZPD (mm) des Standorts Brüssel (BRUS) für Juli 2010 bis Juli 2011 (oben) und 3. Oktober 2010 bis 17. Oktober 2010 (unten)

Ein Modell, das mehr und mehr für die Korrektur von Troposphärenfehlern Verwendung findet, ist das sog. „blinde“ Modell „TropGrid“. Sie wurde als Standard-Korrekturmodell für Galileo entwickelt (siehe KRÜGER et al. [2004]). Für die Bereitstellung der ZPD-Werte können auch verschiedene numerische Wettermodelle (NWM: „Numerical Weather Model“) eingesetzt werden. NWM bieten atmosphärische Informationen mit einer zeitlichen Frequenz, die für die präzise Positionierung nützlich sein könnte. Ein Vorteil der Verwendung von NWM ist, dass das ZPD als Prognosen zur Verfügung gestellt werden können, wodurch eine präzise Positionierung mit E5-Einfrequenz-Daten nahezu in Echtzeit geleistet werden kann.

3.2.11.2.1 TropSite/TropGrid

In Zusammenarbeit mit dem Weltraumforschungs- und Technologiezentrum (ESTEC) der ESA hat das damalige Institut für Erdmessung und Navigation der Universität der Bundeswehr das Standard-Korrekturmodell „TropSite/TropGrid“ für Galileo entwickelt (siehe KRÜGER et al. [2004]). Dabei handelt es sich um einen stationsspezifischen (TropSite) und einen gitterförmigen Ansatz (TropGrid). Der Unterschied zwischen „TropSite“ und „TropGrid“ liegt in der Verwendung eines regelmäßigen $1^\circ \times 1^\circ$ -Gitters bei „TropGrid“, wohingegen bei „TropSite“ stationsspezifische Modellparameter für eine Vielzahl von Stationen des IGS- und EUREF-Netzes, für verschiedene EGNOS-Bodenstationen sowie Orte geplanter Galileo-Stationen bestimmt wurden. Darüber hinaus wird der partielle Wasserdampfdruck bei „TropSite“ aus der Temperatur und der relativen Luftfeuchte berechnet, während er bei „TropGrid“ unmittelbar auf Modellgitter gegeben wird.

Die hydrostatische Komponente dieses Modelles stammt aus dem SAASTAMOINEN-Modell und der Luftdruck für die Gleichung (3-40) wird folgendermaßen berechnet:

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{t_D - \Delta t_w}{365.25[d]}\right). \quad (3-42)$$

- \bar{p} : Mittelwert des Luftdruckes
- \tilde{p} : Amplitude des Luftdruckes
- t_D : Zeitpunkt als „Tag des Jahres“ (Day of Year, DoY) mit dem Wert 1 für den 1. Januar um 0:00h
- Δt_w : Tag des „maximalen Winters“, der den Wert 28 für die Nordhemisphäre und 211 d für die Südhalbkugel hat, siehe SCHÜLER [2001]

Das „TropSite“ modelliert die feuchte Komponente basierend auf physikalischen Prinzipien, die von den drei meteorologischen Parametern Wasserdampfdruck der Referenzhöhe (Modelloberfläche) e_0 , Gradient des partiellen Wasserdampfdrucks λ und der mittleren Temperatur T_M abhängig sind. Somit erhält man die feuchte Komponente durch:

$$ZWD = 10^{-6} \cdot \frac{k_3}{T_M} \cdot \frac{R_d}{g_m} \cdot \frac{e_0}{\lambda + 1}. \quad (3-43)$$

- K_3 : Refraktionskoeffizient 370100 ± 1200 [$K^2 \text{ hPa}^{-1}$]
- R_d : Gaskonstante der trockenen Luft: 287.054 [$\text{J Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
- λ : Gradient des partiellen Wasserdampfdrucks (Water Vapour Lapse Rate) [--]

Der Wasserdampfdruck wird in Abhängigkeit des Luftdrucks wie folgt ermittelt:

$$e = e_0 \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\lambda+1}. \quad (3-44)$$

Die gewichtete mittlere Erdbeschleunigung wird ausgedrückt durch:

$$g_m = 9,784 \left[\frac{m}{S^2} \right] \left(1 - 0,00266 \cdot \cos 2\varphi - 0,00028 \left[\frac{1}{Km} \right] \cdot h \right) \quad (3-45)$$

Die mittlere Temperatur an der Station T_M [K] errechnet sich aus:

$$T_M = \frac{\int_{H_0}^{\infty} \frac{e}{T} \cdot dH}{\int_{H_0}^{\infty} \frac{e}{T^2} \cdot dH}. \quad (3-46)$$

Ausgehend von diesem physikalischen Modell ergibt sich durch die Summation des ZWD-Modells, des ZHD-Modelles von SAASTAMOINEN und der blinden meteorologischen Parameter aus dem $1^\circ \times 1^\circ$ -Gitter das blinde Modell "TropGrid". Die Berechnung des ZPD-Werts an einer bestimmten Stelle bedeutet zunächst die Verringerung der meteorologischen Größen auf die umliegenden Gitterpunkte der

Stationshöhe. Die mittlere Temperatur T_M ist bei Verwendung des mittleren Abnahmegradients der trockenen Temperatur β_{TM} reduziert:

$$T_{MH} = T_{M0} + \beta_{TM} \cdot (H - H_0) \quad (3-47)$$

Dabei ist T_{MH} die mittlere Temperatur bei der Höhe H , T_{M0} die mittlere Temperatur bei der Höhe H_0 .

Der Luftdruck ergibt sich durch diese Berechnung

$$p_H = p_0 \cdot \left(T_H / T_0 \right)^{-g / (R_d \cdot (\beta_T / 1000))}, \quad (3-48)$$

wobei p_H der Luftdruck bei der Höhe H , p_0 der Luftdruck bei der Höhe H_0 und g die Gravitationsbeschleunigung ist.

Dann wird die ZHD bzw. ZWD an den Gitterpunkten berechnet und schließlich unter Verwendung von neun umliegenden Netzknoten eine horizontale Interpolation auf die Position der Beobachtungsstation durchgeführt.

3.2.11.2 Numerisches Wettermodell

Numerische Wettermodelle lassen sich mit mathematischen Modellen der Atmosphäre und der Ozeane erzeugen und können auf der Basis der gegenwärtigen Wetterbedingungen das Wetter vorhersagen. Mit Bezug auf die gleichen physikalischen Prinzipien lassen mathematische Modelle entweder kurzfristige Wettervorhersagen oder langfristige Klimavorhersagen erzeugen. Verschiedene Wetterdienste (NOAA, MetO etc.) bieten eine Vielzahl von Modellen an. Diese verwenden unterschiedliche Methoden und können daher in ihrer Vorhersage erheblich voneinander abweichen. Die Modelle sind meistens für eine bestimmte Region berechnet und repräsentieren den restlichen Teil der Welt gar nicht oder nur in reduzierter Genauigkeit.

UniBwM NWM:

Die Universität der Bundeswehr München (UniBwM) verwendet zur Schätzung der ZPD-Felder Daten aus dem US-amerikanischen „Global Forecasting System (GFS)“, die einen horizontalen Rasterabstand von ca. 27 km haben. Das Modell verfügt in den Ausgabefeldern über 26 vertikale Ebenen mit einem festen Luftdruckwert (10 hPa bis 1000 hPa) und dazugehörige geopotentielle Höhen, Temperaturen und relative Werte für die feuchte Komponente. Die Felder werden genutzt, um die ZHD- und ZWD-Werte und damit die gesamte Verzögerung ZPD zu berechnen.

Das GFS-Modell liefert seine Analysenfelder alle 6 Stunden um 00:00, 06:00, 12:00 und 18:00 Uhr UTC, zusätzlich eine 3-stündige Prognose für jede Analyse um 03:00, 09:00, 15:00 und 21:00 Uhr UTC. Drei Produkte aus den Analysenfeldern werden nach Angaben von KRÜGER et al., [2004] aus dem Modell abgeleitet:

- Die sog. „Surface Data“, die stündliche Daten über den Luftdruck, die Temperatur und die relative Feuchte enthalten und im Standard RINEX-Format (Meteo)⁵² abgespeichert werden.
- Die sog. „Full Data“: Dies sind stündliche Daten, die Informationen über den Luftdruck, die Temperatur, die relative Feuchte, die mittlere Temperatur der Troposphäre und den Gradient des partiellen Wasserdampfdrucks enthalten. Darüber hinaus geben diese Daten die Werte des trockenen und feuchten Anteils der troposphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung (ZWD und ZHD) an und werden in einem erweiterten Standard-RINEX-Format (Meteo) geliefert.
- Die sogenannten „ZPD Data“, die auch stündliche Daten des ZHD, ZWD sowie der totalen troposphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung ZPD liefern und im SINEX_TRO-Format abgespeichert werden.

Abbildung 3-8 stellt das NWM der UnibwM dar:

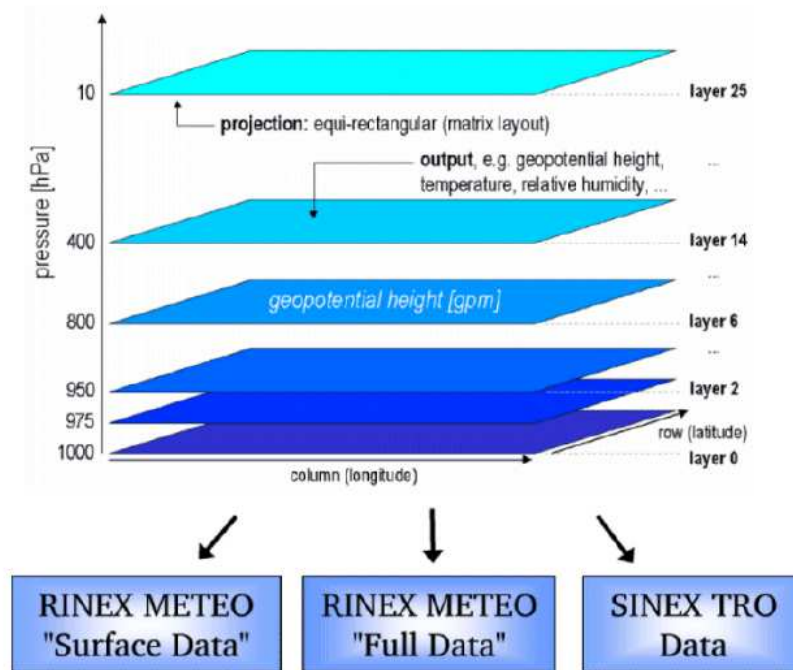


Abbildung 3-8: Numerisches Wettermodell sowie daraus abgeleitete Produkte, SCHÜLER, E. [2008]

EUREF post-prozessierte ZTD:

Zahlreiche Institutionen in Europa prozessieren Daten aus lokalen GNSS-Netzen sowie aus dem permanenten EUREF („European Coordinates Reference System“)-Netz zum Zweck der präzisen Positionierung. Ein Nebenprodukt der Prozessierung dieser Netzdaten ist die Schätzung der ZPD. ZPD-Schätzungen können in Quasi-Echtzeit („Near-Real“) mit Hilfe von vorhergesagten Galileo-Orbit-Parametern, die nützlich für die NWM sind, vorgenommen werden. Eine genauere Schätzung kann

⁵² Formatbeschreibung unter <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex301.pdf>; letzter Aufruf 19.12.2012

durch Warten bis zur tatsächlichen Verfügbarkeit der Endprodukte der Bahn („final orbits“) erreicht werden, um danach in Post-Prozessierung die ZPD-Werte zu berechnen. EUREF sammelt die post-prozessierten Schätzungen aus den regionalen Institutionen und nutzt sie, um einen kombinierten post-prozessierten ZTD-Datensatz für Europa bereitzustellen. Variationen können in den ZPD-Schätzungen aus verschiedenen regionalen Analyse-Zentren auftreten, je nachdem, welche Station, Software oder Methode eingesetzt wurde.

3.3 Beobachtungs- und Koordinatengleichung

Bei den beschriebenen Fehlern handelt es sich um solche, die zu einer direkten Verschlechterung der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung beitragen können. Die Wahl der Beobachtungsmethode hat einen erheblichen Einfluss auf das Fehlerbudget, da eine absolute Messung eine andere Fehlercharakteristik aufweist als eine relative Positionierung. Die relative Positionierung ist im Vergleich zur absoluten Methode von Vorteil, da sie den Einfluss bestimmter Fehler wesentlich reduzieren kann. Ebenfalls ist hinsichtlich des Fehlerbudgets die Wahl zwischen statischer und kinematischer Beobachtung von großer Bedeutung. Statische Beobachtungen sind weniger fehleranfällig als ihre kinematischen Pendanten. In dieser Arbeit werden ausschließlich relative statische Beobachtungen durchgeführt.

Von der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierungsmethode wird eine Genauigkeit im Bereich von wenigen Zentimetern gefordert. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die nach der doppelten Differenzierung verbleibenden Fehler eliminiert bzw. zumindest reduziert werden. Diese Fehler können im Regelfall über Modellbeschreibungen kompensiert werden. Damit wird die doppelte differenzierte CPC-Gleichung um die funktional modellierten Korrekturen erweitert:

$$\begin{aligned} \nabla \Delta CPC_{AB}^{ij} = & \nabla \Delta \rho_{AB}^{ij} - \frac{\lambda}{2} \cdot \nabla \Delta N_{AB}^{ij} + \nabla \Delta \delta ZHD_{AB}^{ij} + \nabla \Delta \delta ZWD_{AB}^{ij} \\ & + \nabla \Delta \delta M_{CPC} + \nabla \Delta \delta S_{AB[PCV]}^{ij} + \nabla \Delta \delta S_{AB[REL]}^{ij} \end{aligned} \quad (3-49)$$

$\nabla \Delta \rho_{AB}^{ij}$:	Geometrische Entfernung in doppelter Differenzform
λ :	Wellenlänge
$\nabla \Delta N_{AB}^{ij}$:	Mehrdeutigkeitsterm
$\nabla \Delta \delta ZHD_{AB}^{ij}$:	Hydrostatische Laufzeitverzögerung in der Troposphäre
$\nabla \Delta \delta ZWD_{AB}^{ij}$:	feuchte Laufzeitverzögerung in der Troposphäre
$\nabla \Delta \delta M_{CPC}$:	Mehrwegefehlerkorrektur
$\nabla \Delta \delta S_{AB[PCV]}^{ij}$:	Phasenzentrumskorrektur
$\nabla \Delta \delta S_{AB[REL]}^{ij}$:	Relativistische Korrektur

Dieser Ansatz deckt jedoch nicht Restfehler ab, die sich zufällig verhalten. Deshalb müssen diese durch die stochastische Modellierung in der Kovarianzmatrix der Beobachtungen erfasst werden. Dieser Schritt garantiert eine korrekte Gewichtung

aller Parameter des Ausgleichsvektors. Das stochastische Modell der Beobachtungen besteht aus Teilmatrizen:

$$\underline{\Sigma}_{LL} = \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta CPC} + \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta CPC [MW]} + \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta CPC [SAT]} + \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta CPC [H]} + \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta CPC [F]} \quad (3-50)$$

- $\underline{\Sigma}_{\nabla\Delta CPC}$: Kovarianzmatrix der CPC-Messgenauigkeiten
- $\underline{\Sigma}_{\nabla\Delta CPC [MW]}$: Stochastisches Modell zur Mehrwege-Mitigation auf SNR-Basis
- $\underline{\Sigma}_{\nabla\Delta CPC [SAT]}$: Kovarianzmatrix der Satelliten-Koordinatenfehler
- $\underline{\Sigma}_{\nabla\Delta CPC [H]}$: Kovarianzmatrix der hydrostatischen Laufzeitverzögerungen
- $\underline{\Sigma}_{\nabla\Delta CPC [F]}$: Kovarianzmatrix der feuchten Laufzeitverzögerungen

Die Koordinatengenauigkeiten werden durch das Anbringen von verschiedenen Korrekturen verbessert:

$$\underline{X}(t) = \underline{X} + \delta \underline{X}_{AE} + \delta \underline{X}_{[PCV]} + \delta \underline{X}(t)_{[VSP]} + \Delta \underline{X}(t)_{[GZ]} + \Delta \underline{X}(t)_{[OA]} + \Delta \underline{X}(t)_{[ER]} \quad (3-51)$$

- \underline{X} : Fester Positionsvektor, bezogen auf eine bestimmte Referenzepoche
- $\delta \underline{X}_{AE}$: Korrekturvektor aufgrund der Exzentrizität der Antenne
- $\delta \underline{X}_{[PCV]}$: Korrekturvektor aufgrund des Phasenzentrum-Offsets
- $\delta \underline{X}(t)_{[VSP]}$: Korrekturvektor aufgrund der Stationsbewegungen
- $\Delta \underline{X}(t)_{[GZ]}$: Korrekturvektor aufgrund der Gezeiten der festen Erde
- $\Delta \underline{X}(t)_{[OA]}$: Korrekturvektor aufgrund der ozeanischen Auflasten
- $\nabla \Delta \delta S_{AB[ER]}^{ij}$: Korrekturvektor aufgrund der Variation der Erdrotationsparameter

Die Korrekturanbringung soll bewirken, dass man die genauesten CPC-Beobachtungsgrößen erhält, die zu einer einfachen Fixierung der Mehrdeutigkeitsterme und somit zu einer deutlichen Verkürzung der Konvergenzzeit der Positionsparameter führen. Dadurch ergibt sich die optimale Präzision der Positionslösung.

4 Anwendungsbereiche und Testbeschreibungen

Ziel dieses Kapitels ist es, herauszufinden, welche der vielen präzisen wissenschaftlichen und nicht-wissenschaftlichen GNSS-Applikationen für die Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung am besten geeignet sind. Es steht fest, dass die Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung nicht in der Lage sein wird, die hohen Genauigkeitsanforderungen bestimmter Anwendungen zu erfüllen. Dennoch werden viele andere GNSS-Anwendungen von einer Genauigkeitssteigerung durch die Einfrequenz-Positionierung mit Galileo E5 profitieren. Im ersten Teil dieses Kapitels wird ein Einblick in die zu erwartende Genauigkeit gegeben und das Thema des Referenzstationen-Netzzugangs behandelt. Abschließend werden bezüglich der beiden ersten Aspekte die bestgeeigneten Anwendungen präsentiert. In einem zweiten Teil werden verschiedene Positionierungs-Testszenarien beschrieben, die es im späteren Verlauf dieser Arbeit ermöglichen sollen, die Leistungsfähigkeit der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung näher zu analysieren.

4.1 Genauigkeitserwartungen

Die Genauigkeit der Positionierung wird als 3D-Standardabweichung der Positionsergebnisse ermittelt. Ausgehend von Erfahrungswerten aus früheren Studien werden die zu erwartenden Genauigkeiten bei der Verwendung der zwei behandelten Einfrequenz-Positionierungsverfahren (CPC und RCF) dargestellt (siehe Abbildung 4-1).

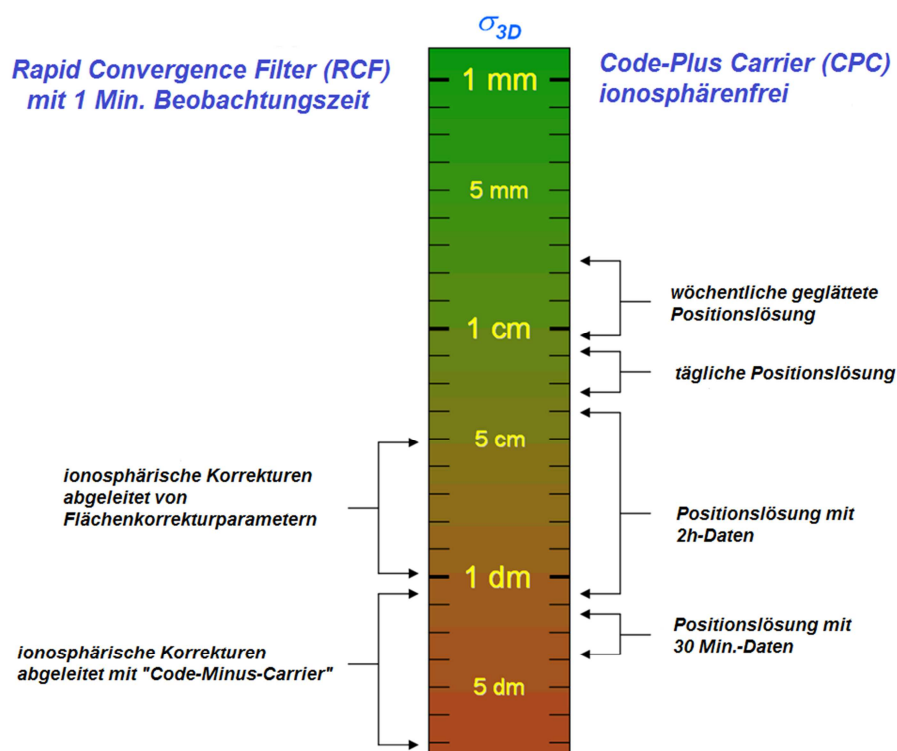


Abbildung 4-1: zu erwartende 3D-Genauigkeiten unter Nutzung der beiden E5-Einfrequenz-Positionierungsansätze

Die Genauigkeit der CPC-Methode wird aus Ergebnissen verschiedener Studien mit GPS-Daten, die eine höhere Standardabweichung aufweisen, interpoliert. Diese

Interpolation geschieht, indem das Multipath-Niveau der GPS-Daten unter Verwendung vorhandener Multipath-Leistungsinformationen etwa dem E5-Multipath-Niveau angepasst wird und somit die Genauigkeit der E5-Einfrequenzpositionierung ungefähr abgeschätzt wird.

Der Mehrdeutigkeitsparameter der CPC-Beobachtungsgröße (siehe Gleichung 2-24) stellt einen limitierenden Faktor für die Positionierungsgenauigkeit dar, da er die Konvergenzzeit bis zum Erreichen des geforderten Genauigkeitsniveaus im Zentimeter-Bereich erhöht. Diese Tatsache wird in Abbildung 4-1 widerspiegelt, gemäß der nach einer Beobachtungszeit von 30min Genauigkeiten nur im Dezimeter-Bereich zu erwarten sind. Um Genauigkeiten von wenigen Zentimetern zu erreichen, müssen Beobachtungsdaten von mindesten zwei Stunden prozessiert werden. Dies kann je nach Messumgebung variieren: Tatsächlich kann das Streuungsmaß der Positionsergebnisse bei unterschiedlichen Multipath-Szenarien relativ stark variieren.

Im Hinblick auf die RCF-Methode wird eine Beobachtungszeit von ungefähr einer Minute angesetzt, um schnell genaue Koordinaten zu erhalten. Folglich ist es nicht sinnvoll, die ionosphärische Laufzeitverzögerung zu schätzen oder zu beseitigen, weil sie die Konvergenz der Filterungsparameter verzögert. Der Ionosphärenfehler wird durch die Anwendung von externen Korrekturquellen (z.B. IONEX-Daten) mitigiert. Die ionosphärischen Korrekturen können auch aus der subtraktiven Kombination der Code- und Trägerphasenmessungen (CMC) von Einfrequenz-Daten abgeleitet werden. Damit wird eine 3D-Standardabweichung von ca 7 dm bis zu ca. 1 dm innerhalb einer kurzen Beobachtungszeit (ca. 5 min) erwartet. Eine weitere Verbesserung der Genauigkeit kann mit der Verwendung von Flächenkorrektur-Parametern (FKP) aus einem aktiven GNSS-Referenz-Netz (in Deutschland z.B. das SAPOS-Netz) erreicht werden, wobei Trägerphasendaten genutzt werden, um dispersive und nicht-dispersive Korrekturen abzuleiten. Je nach Gewichtung der Code- und Trägerphasenmessungen (und der Interpolationsfehler der FKP) ist eine 3D-Standardabweichung bei der RCF-Methode von etwa 1 dm bis zu 5 cm zu erwarten.

4.2 Netz-Zugang

Die Berechnung der Einfrequenz-Positionslösung beruht auf der relativen Positionierung. Der Zugang zu einem Netz, das Referenzstations-Daten zur Verfügung stellt, ist unerlässlich und wird daher vorausgesetzt. Für die Prozessierung sind Daten von mindestens einer Referenzstation erforderlich. Aus diesem Grund wird in diesem Unterkapitel ein kurzer Überblick über relevante Aspekte solcher Referenznetze gegeben. Tabelle 4-1 zeigt eine Zusammenfassung typischer Netze, die für die Berechnung von Einfrequenz-Positionskoordinaten über verschiedene Basislinien herangezogen werden können. Es können drei große Kategorien identifiziert werden: Wissenschaftliche, kommerzielle und lokale Netze. Die wissenschaftlichen Netze dienen Zwecken der Wissenschaft (z.B. für die Etablierung von globalen Koordinatensystemen). Ihre Daten sind bis jetzt frei zugänglich. Als Beispiele für solche Referenznetze können das globale IGS-Netz und andere regionale Netze wie EUREF (in Europa) oder AFREF (in Afrika) genannt werden. Sowohl das IGS-Netz (global) als auch das EUREF-Netz (Europa bzw. Eurasien), bieten tägliche und stündliche sowie hochauflösende (1Hz) Daten. Die 1Hz-Daten werden alle 15min (für nahezu Echtzeitpositionierungs-Zwecke) zur Verfügung gestellt. Die täglichen

und stündlichen Daten, die in der Regel mit einer Auflösung von 30s geliefert werden, werden am Ende jeden Tages veröffentlicht. Zurzeit werden Galileo-Daten nicht global bereitgestellt, obwohl das experimentelle Forschungsprojekt namens MGEX seit kurzem Galileo-Daten für wenige IGS-Stationen produziert. Die Daten können online über NTRIP („Networked Transport of RTCM via Internet Protocol“)⁵³ heruntergeladen werden. Das AFREF-Netz in Afrika ist immer noch im Aufbau. Nach dessen Fertigstellung werden alle Kontinente über ein regionales Netz verfügen.

Wissenschaftliches Netz	Kommerzielles Netz	Lokales Netz
IGS-Netz	Aktives regionale Netz (z.B. BFCORS)	UniBwM-Testnetz
EUREF/AFREF-Netz	EGNOS-Netz (EDAS)	

Tabelle 4-1: Arten von GNSS-Referenznetzen

Als Beispiele für kommerzielle Netze werden in der Tabelle 4-1 zwei Netze genannt. Die Daten und Dienste solcher Netze sind in der Regel kostenpflichtig. Das BFCORS⁵⁴ ist ein Beispiel für ein kommerzielles regionales aktives Referenznetz. Es liegt in Burkina Faso (Afrika) und besteht aus neun Stationen, die Daten verschiedener Auflösungen liefern. Viele Länder haben ein derartiges regionales differentielles Netz implementiert. Ein weiteres bekanntes Beispiel ist das deutsche SAPOS-Netz (mit mehr als 250 Stationen). EGNOS/EDAS als nicht regionales, sondern kontinentales System (Europa und seine angrenzenden Teile wie Nordafrika) kann auch mit seinen RIMS („Ranging Integrity Monitoring Stations“) Referenzdaten liefern.

Der Aufbau von lokalen Referenzstationen ist immer dann möglich, wenn der Nutzer über die notwendige Ausrüstung bzw. Empfänger verfügt. Der Einsatz einer lokalen Referenzstation bringt den Vorteil, dass man diese über sehr kurze Basislinien etablieren und kontrollieren kann. Die relative Positionierung über kurze Basislinien (<10 km) erlaubt die Eliminierung aller redundanten Fehler und speziell der atmosphärischen Fehler, da über kurze Basislinien dieselben atmosphärischen Bedingungen herrschen.

4.3 Relevante Applikationen und ihre Genauigkeitsanforderungen

Die Eignung des Galileo E5-Einfrequenz-Positionierungsansatzes wird hier im Hinblick auf einzelne Anwendungen beurteilt. Ziel dieser Bewertung ist es, unter verschiedenen GNSS-Positionierungsaufgaben herauszufinden, welche mit den Fähigkeiten der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung realisiert werden können.

⁵³ NTRIP ist ein Protokoll für das Streaming von Differential-GNSS-Daten über das Internet.

⁵⁴ Daten des BFCORS können unter <http://bfcors.net/> heruntergeladen werden; letzter Aufruf 15.12.2012

4.3.1 Gesamtschau der Applikationen

In der folgenden Gesamtschau werden Einschätzungen über die Eignung der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung für verschiedene Anwendungen porträtiert.

Beschreibung	Präzision (σ) Datenpaket	Latenz	Eignung	Bemerkungen
PRÄZISE POSITIONIERUNG				
Null-Ordnung-Referenznetz, z.B. ITRF und kontinentale Verdichtung wie EUREF und AFREF	3D: mm - cm <i>täglich/wöchentlich</i>	Post-Prozessierung	▼	Etabliert für wissenschaftliche Ziele; wird durch die wissenschaftliche Gemeinde betreut.
Aktives Referenznetz (z.B. SAPOS: deutsches RTK-Netz)	2D: 1,0 cm 3D: 1,5 cm <i>täglich/wöchentlich</i>	Post-Prozessierung	▲ ■	Genauigkeitsanforderung kann erfüllt werden, wenn die wöchentliche geglättete Lösung verwendet wird.
Netz 1./2./3. Ordnung	2D: 2,5-7,5 cm ⁽¹⁾ H: 5 cm ⁽¹⁾ <i>stündlich/täglich</i>	Post-Prozessierung	▲	Durch Vermessungsämter als nationale Verdichtung der globalen Netze oder trigonometrischen Punkte etabliert. Die Genauigkeitsanforderung ist erfüllbar. In mehreren Ländern der Welt (z.B. in Afrika) sind die Anforderungen noch geringer.
Katastervermessung	2D: 2 cm ⁽¹⁾ 2D: 5 - 30 cm ⁽²⁾ <i>1 - 15 min</i>	fast-Echtzeit (Post-Prozessierung)	■	¹⁾ in Deutschland; ²⁾ geringere Genauigkeitsanforderungen in vielen anderen Ländern. Die Beobachtungszeit kann kürzer sein.
Bodenkontrollpunkte (z.B. für Luftphotogrammetrie, Erdbeobachtungsmissionen wie GMES- und LEO-Missionen)	2D: 10 cm - 10 m H: 10 cm - 5 m <i>1 - 15 min</i>	fast-Echtzeit (Post-Prozessierung)	■	Hilfe für Aero-Triangulation, Orthorektifikation und Bahnverbesserung der LEO-Satelliten
Hoch präzise Topographie, GIS und kartographische Anwendungen	H: 1 - 10 cm <i>1 - 15 min</i>	fast-Echtzeit (Post-Prozessierung)	■	Kurze Beobachtungszeit
Schweremessungen	H: 3 - 25 cm <i>1 - 15 min</i>	fast-Echtzeit (Post-Prozessierung)	■	Kurze Beobachtungszeit
POSITIONENÄNDERUNGEN				
Typische kurze Basislinien-Überwachungsnetze (Staudamm-Deformation, Vulkan-Überwachung)	sub-mm - sub-cm <i>ständig</i>	fast-Echtzeit (Post-Prozessierung)	▼	Nur machbar mit Trägerphasenmessungen, Basislinien < 10 km.
Langzeitänderung, tektonische Plattenbewegungen, Post-	≤ mm/year <i>wöchentlich</i>	Post-Prozessierung	▼	Genauigkeitsanforderung ist zu hoch für Einfrequenz-Messungen.

glaziale Landhebung				
Überwachung von Positionsänderungen (z.B. Gletscher/Eis)	cm/year - m/day <i>täglich/wöchentlich</i>	(fast-Echtzeit) Post- Prozessierung	▲	Ist machbar.

Tabelle 4-2: Gesamtschau der Eignung der Galileo E5-Einfrequenzpositionierung für verschiedene GNSS-Anwendungen:

▲-gut geeignet ■-bedingt geeignet ▼-nicht geeignet

4.3.2 Anforderungen an die präzise Positionierung

Die Einsatzgebiete der präzisen Positionierung und in der Folge auch die Anforderungen an die Genauigkeit sind vielfältig. Die sogenannten Null-Ordnung-Netze wie das globale IGS-Netz und kontinentale Verdichtungen wie EUREF und AFREF wurden für wissenschaftliche Zwecke etabliert und werden von der wissenschaftlichen Gemeinschaft gepflegt. Die Daten werden täglich erhoben und verarbeitet. Wöchentliche geglättete Ergebnisse erreichen eine 3D-Genauigkeit von 5 mm bis 1 cm; diese Anforderungen müssen über sehr lange Basislinien erfüllt werden. Der Ansatz der Einfrequenz-Positionierung mit Galileo E5 ist weit davon entfernt, Millimeter-Genauigkeiten zu erzielen. Im offenen Gelände, in dem kaum Multipath-Effekte auftreten, könnte die Genauigkeit zwar über sehr kurze Basislinien den Submillimeter-Bereich erreichen, jedoch nicht über längere Basislinien. Die Verwendung von Codemessungen in diesem Ansatz (hohe Einflüsse von Messrauschen und Multipath) macht die Erfüllung der Millimeter-Genauigkeitsanforderung fast unmöglich. Daher sind die CPC- und RCF-Methoden für Anwendungen mit derartig hohen Genauigkeitsanforderungen nicht geeignet. Bei der Realisierung und dem Betrieb von Null-Ordnung-Netzen werden darum weiterhin Multifrequenz-Empfänger mit Trägerphasenmessungen eingesetzt.

Viele Länder haben ihre lokalen Referenznetze verdichtet (z. B. Deutschland mit SAPOS, die Schweiz mit SWIPOS und Burkina Faso mit BFCORS). Diese nationalen Verdichtungen bestehen meist aus Stationen mit Zwischenentfernungen von 20-70 km (in manchen Fällen sogar noch längeren Entfernungen), so dass diese als Referenzen eingesetzt werden können, um die RTK-Positionierung zu realisieren. Sie erlauben es, bezüglich ihres Wirkungsbereichs in Echtzeit Koordinaten im Zentimeter-Bereich zu erzielen. Dies geschieht, in Abhängigkeit von der erforderlichen Genauigkeit, in der Regel mittels relativer Positionierungstechniken wie RTK- oder DGNSS-Methoden. Für den Betrieb des Referenznetzes werden täglich Daten gesammelt, um die Positionen der Stationen zu berechnen. Diese Lösungen werden wöchentlich geglättet und ergeben eine horizontale Genauigkeit von 1 cm und eine 3D-Genauigkeit von 1,5 cm. Für diese Aufgaben werden bis jetzt ausschließlich Mehrfrequenz-Trägerphasenmessungen genutzt. Theoretisch können diese Anforderungen bei der wöchentlichen geglätteten Lösung jedoch auch durch den E5 CPC-Positionierungsansatz erreicht werden (siehe Abbildung 4-1).

Darüber hinaus gibt es die Netze verschiedener Ordnungen (1. bis 4. Ordnung) der Landesvermessungen. Diese bestehen aus nationalen Verdichtungs- und trigonometrischen Punkten. Die Basislinienlänge zwischen den Stationen beträgt je nach Ordnung zwischen 20 km bis 100 km. Die Genauigkeitsanforderungen liegen hier bei 2,5 - 7,5 cm horizontal und 5 cm vertikal. Die CPC-Genauigkeit übertrifft diese Anforderungen bei weitem. In der Folge stellt die Galileo E5-Einfrequenz-

Positionierung hier eine präferenzielle Alternative gegenüber den von vielen Landesvermessungsbehörden genutzten kostenintensiven RTK-Methoden dar.

Die Katastervermessung erfolgt über eine kurze Beobachtungszeit (1 bis 15 min). Ihr Zweck ist es, eine ökonomisch rentable Vermessung von Liegenschaften zu ermöglichen. Die Genauigkeitsanforderung für Katastervermessungsaufgaben liegt im Bereich von 2 cm horizontal und 3-5 cm 3D in Deutschland gegenüber nur einigen Dezimetern in vielen anderen Regionen der Welt. Aufgrund der kurzen Beobachtungszeit können die Genauigkeitsanforderungen nicht durch den CPC-Ansatz erfüllt werden. Die Katastervermessung könnte aber ein idealer Anwendungsfall für die RCF-Methode sein, die eine schnelle Bestimmung von Positionen in beinahe Echtzeit erlaubt. Ein Blick auf die Abbildung 4-1 lässt schließen, dass mit den erzielten Genauigkeiten der RCF-Methode den Anforderungen der Katastervermessung bspw. in Deutschland nicht Genüge getan wird. In den Regionen der Welt mit geringeren Genauigkeitsanforderungen (nur im Dezimeter-Bereich) wird die Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung (RCF) jedoch für die Katastervermessung eine willkommene, kostengünstigere Option bieten.

Die Bestimmung von Bodenkontrollpunkten für Aero-Triangulation, die Orthorektifikation von Bildern und die Bahnkorrektur für LEO (Erdbeobachtungs)-Satelliten sind in fast allen Satellitenmissionen Aufgaben, die Positionsangaben erfordern. Die Bestimmung der Positionen erfolgt zunehmend über die GNSS-Technik. Die Genauigkeitsanforderungen für diese Aufgaben liegen im Dezimeter- bis Subdezimeter-Bereich und können somit durch den CPC-Ansatz realisiert werden.

Bei der präzisen Topographie und Erdschweremessung sind ebenfalls Genauigkeiten im Dezimeter- bis Subdezimeter-Bereich erforderlich, so dass der CPC-Ansatz hier ohne Bedenken verwendet werden kann. Bei GIS- und kartographischen Anwendungen soll die Positionsbestimmung innerhalb von maximal 1 min erledigt werden. Dabei verringert sich allerdings die Genauigkeit (nur noch Meter-Bereich). Somit ist die RCF-Methode für diese Art von Kurzzeit-Beobachtungen in nahezu Echtzeit geeignet.

4.3.3 Anforderungen an die Detektion von Positionsänderungen

Die Detektion von Positionsänderungen erfolgt durch die Differenz zweier verschiedener Positionsbestimmungen desselben Punktes. Die als Funktion der Zeit ausgedrückten aufeinanderfolgenden Positionen des Punktes werden Positionszeitreihen genannt. Dieses Vorgehen wird in vielen Anwendungen genutzt, um z. B. die Infrastruktur oder Naturphänomene zu überwachen. Es wird zwischen drei Möglichkeiten zur Feststellung von Positionsänderungen unterschieden:

Zum einen gibt es die typische kurze Basislinien-Überwachung mit Basislinienlängen unter 10 km, die oft z.B. für die Feststellung von Staudamm-Verformungen verwendet wird. Bei diesem Ansatz geht es darum, Änderungen in der Position eines Punktes von nur wenigen Millimetern bis zu Sub-Zentimetern innerhalb sehr kurzer Zeit zu bestimmen. Diese Anforderungen übertreffen das Leistungsvermögen der Positionierung mit Einfrequenz-Empfängern. Für derartige Anwendungen empfiehlt sich daher weiterhin die Nutzung genauerer Mehrfrequenz-Trägerphasenmessungen, um die hier geforderten Genauigkeiten erzielen zu können.

Zum anderen kann eine langfristige Überwachung von Strukturen (z.B. Überwachung tektonischer Plattenbewegungen, Intra-Plattenverformungen etc.) implementiert werden. Dafür werden tägliche (oder wöchentliche) Zeitreihen der Positionen betrachtet, um über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr lineare Trends (bzw. andere Modelle) in der Bewegung von z.B. tektonischen Platten zu bestimmen. Dabei liegt die Genauigkeitsanforderung – vor dem Hintergrund einer Plattenbewegungsrate von nur wenigen Zentimetern pro Jahr - bei 0,1 bis 5 mm/Jahr. Auch diese Anforderung können Einfrequenzmessungen keinesfalls gerecht werden.

Schließlich geht es häufig um spezielle Überwachungsaufgaben (z.B. Gletscher- und Eisüberwachung, Erdbeben-Überwachung und Positionsänderungen nach Erdbeben) zum Einsatz. Ihr Ziel ist es, Kenntnisse, z.B. über die Eisdicke, die Geschwindigkeit der Eisbewegungen sowie die Höhe und Fläche der Schneeakkumulation, zu sammeln. Für Aufgaben dieser Art eignet sich die Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung, da ihre Genauigkeitsanforderung im Bereich von einigen cm/Tag bis zu einigen m/Jahr liegt (beispielsweise Beobachtung von Eisbewegungen). Diese kann von der CPC-Beobachtung ohne weiteres geleistet werden.

4.3.4 Andere spezielle Anwendungen

4.3.4.1 Seegangüberwachung

In diesem Abschnitt werden einige spezielle Anwendungen zusammengefasst wie die Hydrographie, die Überwachung der Änderung des Meeresspiegels, die Bestimmung der Wellenhöhe und die Tsunami-Detektion durch Seegangüberwachung, die zunehmend GNSS-Technologien für verschiedene Aufgaben nutzen:

Die Hydrographie befasst sich mit der Vermessung der Form von Fluss-, See- und Meeresböden (See- und Gewässervermessung). Die Genauigkeit der dynamischen hydrographischen Vermessung ist stark von den gemessenen Komponenten, deren Genauigkeiten, von der parametrischen Korrelation (Zeit, Distanz und Geschwindigkeit) der physikalischen Modelle und den Korrekturdaten abhängig. Beobachtungen über kurze Zeiträume stellen hier sicher, dass kurzfristige physikalische Variationen der Messumgebung (Wasser oder Luft) erfasst werden können. Die Anwendung der Einfrequenz-Methoden wird hier durch die geringe Verfügbarkeit von Referenzstationen in Küstenregionen erschwert. Außerdem werden die optimalen Genauigkeiten bei Basislinien mit nicht mehr als 1000 km Länge erreicht. Diese Umstände machen den Einsatz der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung für die Messung der Hydrographie nur bedingt geeignet.

Auch für die Feststellung von Änderungen des Meeresspiegels wird immer mehr GNSS-Technologie eingesetzt. Bei den Beobachtungen handelt es sich hier um langfristige Prozesse. Der aktuelle Anstieg des Meeresspiegels wird für das vergangene Jahrhundert auf eine mittlere Rate von 1,8 mm/Jahr geschätzt. Diese hohe Genauigkeitsanforderung macht es unmöglich, in diesem Bereich Positionen mit Einfrequenz-Empfängern zu berechnen.

Einige Aufgaben wie die Bestimmung von Wellenhöhen hingegen, bei der die Geschwindigkeit der Wellen benötigt wird, um durch Integration die Wellenhöhe zu

ermitteln, dürften mit Einfrequenz-Messungen machbar sein, da deren Genauigkeitserfordernis nur im Dezimeter- bis Subdezimeter-Bereich liegt.

Für die Tsunami-Detektion wird die Änderung der Wellenhöhe gemessen, die im Fall eines Seebebens mehrere Meter erreichen kann. Hierfür werden derzeit GPS L1-Trägerphasenmessungen verwendet, die relevante Genauigkeitsanforderung könnte jedoch ebenso mit Galileo E5-CPC erbracht werden.

Folglich würde der Einsatz von Galileo E5-Einfrequenz-Empfängern keine herausragende Innovation im Bereich der Seegangüberwachung darstellen. Jedoch könnte er die ständige Problematik der Kompromissfindung zwischen vertretbaren Empfängerkosten und bestmöglicher Genauigkeit lösen und somit in vielen Fällen eine aus Kosten-Nutzen-Sicht gute Alternative zu den bestehenden Mehrfrequenz-Empfängern darstellen.

4.3.4.2 *Luftgestützte Anwendungen*

Fluggravimetrie: Mit Hilfe der Fluggravimetrie wird das Gravitationsfeld der Erde in einem mittleren Auflösungsbereich erfasst, was der Ergänzung der terrestrischen und satellitengestützten Gravimetrie-Verfahren dient. Für diese Aufgabe werden zumeist kinematische GNSS-Messungen in Kombination mit Inertialsystemen (INS) verwendet. Die Herausforderung der Fluggravimetrie liegt darin, dass anders als auf der festen Erde die Beschleunigung der Bewegung hinzukommt, die erheblich stärker variiert als das Schwerefeld und daher herausgerechnet werden muss. Die dazu benutzte kinematische GNSS-Positionierung muss auf eine relative Genauigkeit von möglichst besser als ca. 5 cm entlang der Flugtrajektorie abzielen (siehe BOEDECKER [2002]). Da Trägerphasenmessungen für die Ableitung kinematischer Beschleunigung besser geeignet sind, werden in dem Bereich Zweifrequenz-Empfänger genutzt. Es bleibt jedoch anzumerken, dass die Genauigkeitsanforderung durch E5 Einfrequenz-Messungen erfüllt werden könnte, wenn die Auswirkung von Multipath in Grenzen gehalten wird.

Präzise Landungsmanöver: Obwohl die Genauigkeitsanforderungen in diesem Bereich durch die E5-CPC unschwer erfüllt werden könnten, stellt die Angabe der Integrität der Messungen ein großes Hindernis dar: Bei Trägerphasenmessungen kann es zu Unterbrechungen in Form von Phasensprüngen kommen. In diesen Fällen ist es notwendig, eine zuverlässige Erkennung der Sprünge zu gewährleisten. Dabei ist der Einsatz von Multifrequenz-Empfängern vorteilhafter gegenüber demjenigen von Einfrequenz-Empfängern. Ein weiteres Problem für die E5 Einfrequenz-Methoden könnte die hohe Anforderung an die Kürze der Bearbeitungszeit der Messungen sein. Diese wäre mit der RCF-Methode zwar in der Regel lösbar, die Methode ist jedoch bei der schnellen Lösung der Mehrdeutigkeiten von der Einführung externer Informationsquellen (Ionosphären- und Troposphärenmodelle) abhängig, was die Erfüllung der Integritätsanforderung für die präzise Landung erschweren würde. Daher wäre die Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung für präzise Landungsmanöver kein geeigneter Ansatz.

4.4 Testsznarien-Beschreibungen

Die hier behandelten Testsznarien dienen der Analyse der Leistungsfähigkeit der präzisen Positionierung sowie der Detektion von Positionsänderungen mittels der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierungsmethoden. Die Tests werden über Netze mit unterschiedlichen Basislinienlängen - kurze (< 10 km), mittlere (> 100 km) bzw. lange (ca. 1000 km) - durchgeführt und vereinen folgende Aspekte der Einfrequenz-Positionierung:

- Durchführung von präzisen Positionsrechnungen unter Einsatz der CPC-Methode einerseits und schnelle Positionsbestimmung unter Verwendung der RCF-Methode andererseits.
- Detektion von Positionsänderungen, die mit der Positionierung verknüpft sind, da die Genauigkeiten der Messungen der Positionsänderung von der Genauigkeit der geschätzten Epoche-zu-Epoche-Positionslösungen abhängen.

4.4.1 Testsznarien für die präzise Positionierung

4.4.1.1 Das Hauptnetz des Positionierungsexperiments

Dieses Netz besteht aus verschiedenen IGS-/EUREF-Stationen und deckt den zentralen Teil Europas ab. Die Stationen des Netzes sind mindestens 200 km voneinander entfernt, siehe Abbildung 4-2. Damit die Leistungen der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierungsmethode auch bezüglich langer Basislinien beurteilt werden können, werden zusätzlich Berechnungen mit Basislinienlängen von ca. 1000 km angestellt.



Abbildung 4-2: aus IGS-/EUREF-Stationen bestehendes Hauptnetz

Die Tabelle 4-3 fasst einige Informationen über die Stationen des Haupttestnetzes zusammen:

<i>ID</i>	<i>Name und Land</i>	<i>Netz</i>
AUTN	Autun / Frankreich	EUREF
BRUS	Brüssel / Belgien	IGS, EUREF
BZRG	Bozen / Italien	IGS, EUREF
CAGZ	Cagliari/ Italien	IGS, EUREF
GRAZ	Graz-Lustbühel / Österreich	IGS,EUREF
HELG	Helgoland/ Deutschland	EUREF, GREF
KLOP	Kloppenheim / Deutschland	EUREF, GREF
MARS	Marseille / Frankreich	IGS, EUREF
MATE	Matera / Italien	IGS, EUREF
NICO	Nicosia-Athalassa / Zypern	IGS, EUREF
NOT1	Noto-Radioastronomy Station, Italien	IGS, EUREF
OSLO	Oslo / Norwegen	IGS, EUREF
ONSA	Onsala / Norwegen	EUREF
POTS	Potsdam, GeoForschungsZentrum / Deutschland	IGS, EUREF, GREF
PTBB	Braunschweig / Deutschland	IGS, EUREF, GREF
SASS	Sassnitz / Deutschland	IGS, EUREF
STAS	Stavanger / Norwegen	IGS, EUREF, GREF
TLSE	Toulouse / Frankreich	IGS, EUREF
TRDS	Trondheim / Norwegen	EUREF
VALA	Valladolid / Spanien	EUREF
VALE	Valencia / Spanien	EUREF
WROC	Wroclaw / Polen	IGS, EUREF
WTZR	Wetzell / Deutschland	IGS, EUREF, GREF
ZIMM	Zimmerwald / Schweiz	IGS, EUREF

Tabelle 4-3: Detaillierte Informationen über die Stationen des Haupttestnetzes

Mit Hilfe dieser Stationen können Netze aus verschiedenen Referenzstationen gebildet werden, um die Koordinaten eines Neupunktes zu bestimmen.

4.4.1.2 Alternatives Testnetz in Afrika

Hintergrund der Implementierung eines Testnetzes in Afrika ist das bessere Preis-Leistungs-Verhältnis eines präzisen Galileo E5-Einfrequenz-Empfängers gegenüber Mehrfrequenz-Empfängern, das gerade in dieser Region zu einem verstärkten Einsatz von GNSS in vielen Bereichen führen könnte. Darüber hinaus sollen die Tests einen Unterschied zwischen den Positionsergebnissen in mittleren Breiten, der Polregion (beides in Europa) sowie in äquatornahen Regionen (Afrika) zeigen. Zudem wird aufgezeigt, ob sich die ionosphärischen Effekte hoher Ordnung in einer äquatornahen Region auf die CPC-Positionsergebnisse auswirken.

Das westafrikanische Land Burkina Faso verfügt über ein aus neun Stationen bestehendes CORS („Continuing Operating Reference Stations“)-Netz (BFCORS, <http://bfcors.net/>), Abbildung 4-3. Das Netz ist gleichmäßig über das Land verteilt und die Stationen sind maximal 500 km voneinander entfernt, weswegen es sich gut für die Zwecke der Testszenarien der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung eignet.

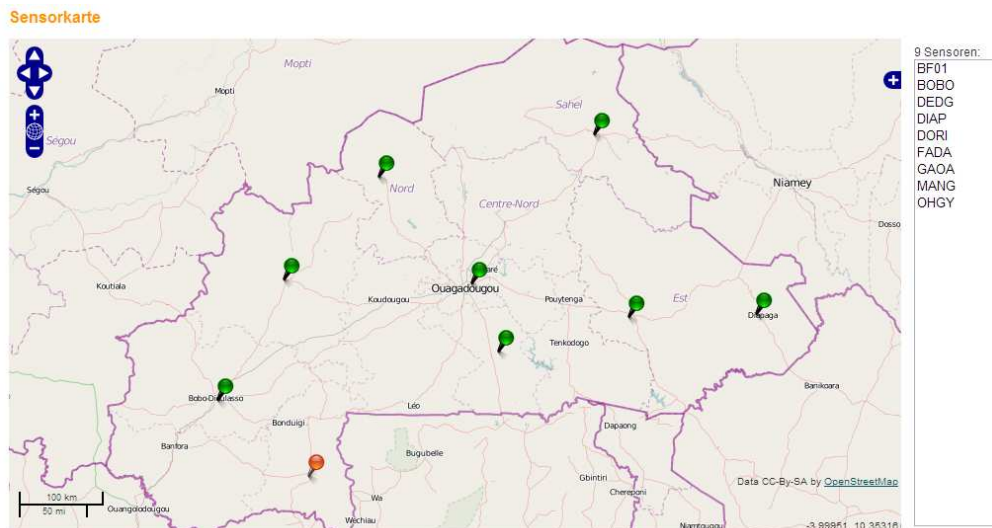


Abbildung 4-3: BFCORS-Netz in Burkina Faso; <http://bfcors.net/Map/SensorMap.aspx> letzter Aufruf 05.12.2012

Die Tabelle 4-4 fasst nochmals Informationen über die Stationen des BFCORS zusammen:

Art	ID	Ort	Projekt	Betreiber
CORS	OUAG (BF1)	Ouagadougou	MCA	IGB/AFREF
CORS	BOBO	Bobo Dioulasso	MCA	IGB
CORS	OUAH	Ouahigouya	MCA	IGB
CORS	MANG	Manga	MCA	IGB
CORS	FADA	Fada N'Gourma	MCA	IGB
CORS	DIAP	Diapaga	MCA	IGB
CORS	GAOU	Gaoua	MCA	IGB
CORS	DORI	Dori	MCA	IGB
CORS	DEDO	Dedougou	MCA	IGB

Tabelle 4-4: Detailinformationen über das BFCORS-Netz

4.4.2 Testsznarien für die präzise Positionierung

Um die Leistungsfähigkeit der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung zu überprüfen, werden verschiedene Sätze von GNSS-Daten prozessiert:

1. Positionsberechnung mit durch Simulation generierten Galileo- und GPS-Daten in folgender Kombination:
 - Galileo E5 (Code-Plus-Carrier Prozessierung)
 - GPS L1 (Code-Plus-Carrier Prozessierung)
 - GPS L5 (Code-Plus-Carrier Prozessierung)
 - GPS L1+L2 (Trägerphasenprozessierung)
 - GPS L1+L5 (Trägerphasenprozessierung)
 - Galileo E1+E5 und GPS L1+L5 (Trägerphasenprozessierung)
2. Positionsberechnung mit realen GPS-Daten in folgender Kombination:
 - GPS L1 (Code-Plus-Carrier Prozessierung)
 - GPS L1+L2 (Trägerphasenprozessierung)

3. Langzeitanalyse der Positionsergebnisse für:
 - Ein Netz aus kurzen Basislinien (< 10 km)
 - Ein Netz aus mittellangen Basislinien (> 100 km)
 - Ein Netz aus langen Basislinien (ca. 1000 km)
4. Positionsberechnung mit reduzierter Galileo-Konstellation und reduzierter GNSS-Multikonstellation:
 - Galileo E5 (CPC mit reduzierter Galileo-Konstellation)
 - Galileo E5+GPS L5 (CPC mit reduzierter Galileo- und GPS-Konstellation)
5. Positionsberechnung mit voller GNSS-Multikonstellation:
 - Galileo E5+COMPASS B2 (CPC mit voller Galileo- und COMPASS-Konstellation)
6. Positionsberechnung mit der RCF-Methode:
 - Für eine kurze Basislinie
 - Für eine lange Basislinie

Die Berechnungen der Positionen werden stufenweise mit einstündigen bis täglichen Messdaten (1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 12h, 18h und 24h) angestellt. Bei der Mehrdeutigkeitslösung wird die Messdatenlänge weiter reduziert. Außerdem werden bei der RCF-Prozessierung Messdaten mit kurzer Beobachtungszeit verwendet.

4.4.3 Bestimmung von Positionsänderungen

Um Positionsänderungen erfolgreich zu detektieren, müssen die einzelnen Positionsergebnisse sehr genau mit einer definierten zeitlichen Auflösung geschätzt werden. Die angeforderte Positionsgenauigkeit ist meist von der zu bestimmenden Bewegungsamplitude abhängig. Mit Bezug auf die Genauigkeitsanforderungen und die zu erwartenden Leistungen eines Galileo E5-Einfrequenz-Empfängers werden im Bereich der Überwachung von Strukturen wissenschaftliche und semi-wissenschaftliche Anwendungen definiert und als Testszenarien für die Leistungsanalysen verwendet.

4.4.3.1 Überwachung von Blockgletschern

Für die Überwachung von Blockgletscher-Bewegungen kommt neben der klassischen geodätischen Methode der Tachymetrie (Verwendung einer „Total Station“) mehr und mehr die GNSS-Technik zum Einsatz. Hierbei werden zur Erfassung der Dynamik der Blockgletscher die Geschwindigkeitsvektoren von ausgewählten Felsbrocken auf der Oberfläche des Gletschers beobachtet (siehe Abbildung 4-4).

Für das Überwachungsverfahren unter Verwendung von GNSS-Technik ist anzumerken, dass nur die Oberflächengeschwindigkeit der Gletscher erfasst werden kann. Dafür werden die Messinstrumente über lange Beobachtungszeiten hinweg eingesetzt (mindestens einen Monat). Mit epochalen Aufnahmen ist es möglich, die Langzeitverschiebung und andere Veränderungen in der Struktur der Gletscher zu beobachten.

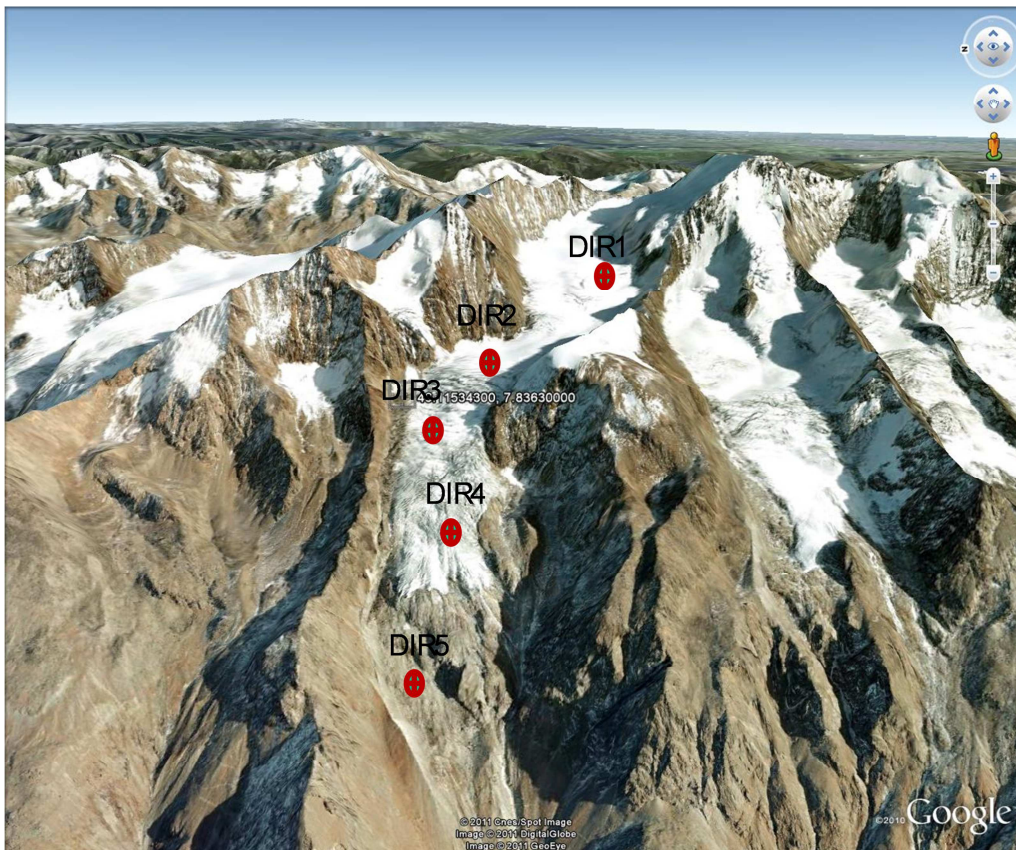


Abbildung 4-4: Netzaufbau für die Dirru-Blockgletscher-Beobachtung

Im Rahmen eines geodätischen Experiments hat die ETH (Eidgenössische Technische Hochschule) Zürich eine Studie in der Region des Dirru-Blockgletschers (Ostseite des Matertals, in der Schweiz) durchgeführt, um die Machbarkeit, die Kosten und die erreichbaren Genauigkeiten einer permanenten Überwachung der Permafrost-Phänomene mittels GNSS-Technik zu analysieren. Basierend auf dieser Studie werden die Anforderungen angepasst und durch den Einsatz von simulierten Galileo E5-Daten erweitert, um einen neuen Test für die Einfrequenz-Positionierung zu definieren. Der Test soll eine Beurteilung ermöglichen, ob die Verwendung von Galileo E5-Einfrequenz-Positionsergebnissen die Voraussetzungen für derartige Überwachungsaktivitäten erfüllen kann.

Der Überwachungsbereich wird für den Test auf einer Höhe zwischen 2000 und 3100 m festgelegt und soll eine Breite von etwa 100 m sowie eine Streifenlänge von ca. 1 km umfassen. Entlang des Überwachungsbereichs werden mehrere Beobachtungstationen simuliert, damit ein klares Profil der Geschwindigkeitsvektoren erstellt werden kann (siehe Abbildung 4-4). Bisher wurden epochale GNSS-Messungen am DIRRU-Blockgletscher entlang mehrerer Quer- und Längsprofile von DELALOYE et al. [2007] vorgenommen. Bei diesen wurden langfristige Bewegungen von bis zu 1,5 m/Jahr ermittelt (siehe Abbildung 4-5).

Da die CPC-Methode doppelte Differenzierungen verwendet, werden außerhalb des Bewegungsbereichs eine oder mehrere Referenzstationen für die Positionsberechnungen benötigt. Die Länge der Basislinien kann sich dabei zwischen kurz (< 10 km) und mittellang (> 100 km) bewegen. In der Realität besteht jede Station des Überwachungsnetzes aus einem GNSS-Empfänger, einer GNSS-Antenne,

einem Datenlogger und einer Solarzellen-Batterie, um die Autonomie der Stationen für Langzeitbeobachtungen zu garantieren. In diesem Test werden die Daten lediglich simuliert.

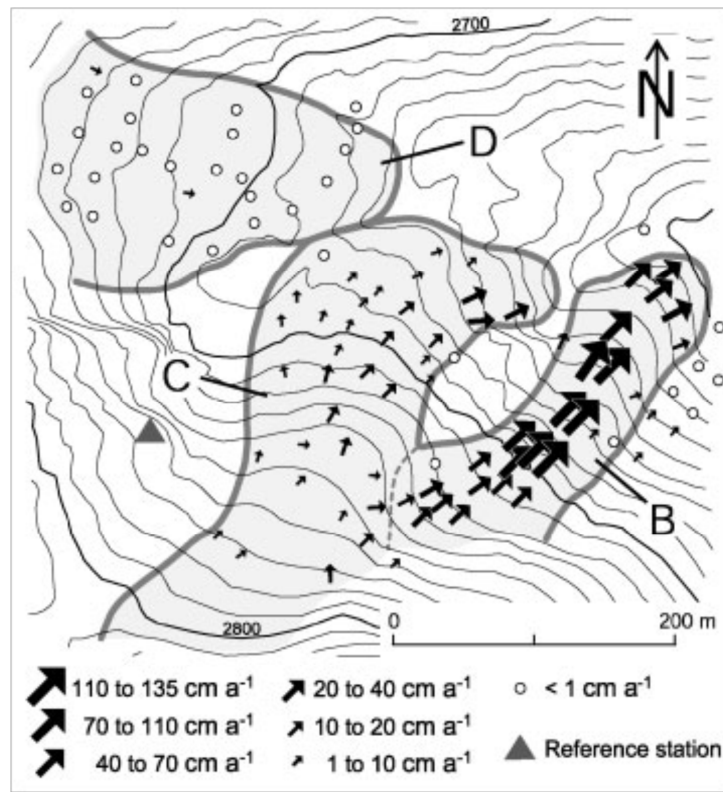


Abbildung 4-5: Jährliche durchschnittliche Geschwindigkeiten von Blockgletschern, LAMBIEL und DELALOYE [2004]

Die simulierten Daten werden mit einer Rate von 1 Hz erzeugt. GNSS ermöglicht zusätzlich zur Bestimmung der relativen 3D-Koordinaten auch die Bestimmung von Bewegungsgeschwindigkeiten und Bewegungsrichtungen der Beobachtungspunkte innerhalb weniger Tage. Die einzelnen Messungen mit einer 1 Hz-Aufzeichnungsrate können nach Mittelung und Glättung der Messergebnisse (aufgrund des Messrauschens) einen Bewegungstrend widerspiegeln.

4.4.3.2 Erdrutsch- bzw. Geländeverschiebungs-Überwachung

Als Erdrutsch wird allgemein das Phänomen einer Verschiebung von Boden-, Gesteins- und organischem Material entlang eines Hanges unter dem Einfluss der Schwerkraft beschrieben, OTHMAN et al. [2011]. Geländeverschiebungen werden häufig durch Erdbeben verursacht. Erdrutsch- bzw. Geländeverschiebungs-Studien lassen sich in drei Phasen unterteilen:

- Erkennung und Klassifizierung
- Überwachung eines gefährdeten Hanges bzw. Geländes
- Analyse und Vorhersage von Hangrutschen im Raum (räumliche Verteilung) und in der Zeit (zeitliche Verteilung)

Unter Verwendung von GNSS-Technologie können die Größenordnung, die Richtung des Rutsches bzw. der Verschiebung und die Grenzen des Erdrutsch- bzw. Verschiebungs- Blocks bestimmt werden. Dabei bietet die GNSS-Technologie folgende Vorteile: Sie ist ein wetterfestes Überwachungssystem und weist keine Einschränkungen auf bezüglich der Anzahl der verwendeten Sensoren, und durch Postprozessierungs-Möglichkeiten bietet sie Flexibilität bei der Analyse. Die Genauigkeitsanforderung zur Überwachung obigen genannter Phänomene liegt in vielen Fällen bei einer Größenordnung von einigen Zentimetern. Es gibt aber auch Erdrutsche mit hohen Bewegungsraten, d.h. im Bereich einiger Dezimeter.

Mit Bezug auf die obigen Ausführungen wird ein Test simuliert, der die Überwachung einer Punktverschiebung (Rutsch des Untergrunds) während eines Erdbebens zeigen soll. In der Tat ereignete sich am 11.03.2011 in Japan ein schweres Erdbeben mit einer Magnitude von ca. 9 auf der Richterskala. Ein solches Ereignis kann enorme Geländeverschiebungen im Bereich vieler Dezimeter bis zu einigen Metern verursachen.

Der Test beinhaltet den Vergleich von Positionsergebnissen direkt vor sowie nach dem Beben. Die Bestimmung der Bewegungsgeschwindigkeit spielt hier keine relevante Rolle, da kein Änderungsprofil der Oberflächentopographie erstellt werden soll. Ziel des Tests ist es, reale GPS-Daten, die während des Erdbebens gesammelt wurden, als Referenzdaten zu nutzen, um die mögliche Überlegenheit der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung bei der Bestimmung von Geländeverschiebungen zu demonstrieren.

5 Datensimulation und -verifizierung

Mit einer vollen Galileo-Satellitenkonstellation ist erst im Jahr 2020 zu rechnen. Die erste reduzierte operationale Konstellation (IOC-Phase) wird voraussichtlich im Jahr 2015 in Betrieb sein. Für die Durchführung der Experimente dieser Studie müssen Galileo-Beobachtungsdaten daher basierend auf zuverlässigen Algorithmen simuliert werden. Darüber hinaus senden zwar GPS und COMPASS/BeiDou bereits ihre respektiven Signale L5 und B2 aus, dennoch reicht die Abdeckung nicht für eine globale Positionsberechnung. Für die Untersuchung der Einfrequenz-Positionsergebnisse der verschiedenen Signale werden alle Daten im Sinne einer Vergleichbarkeit der Bedingungen simuliert. Die notwendigen Schritte für die Simulation der GNSS-Daten werden im folgenden Kapitel erläutert. Die simulierten Daten werden im RINEX-3.0 Format generiert. Die Simulation erfolgt mit Hilfe der Applikation „NEREUS“ (siehe Abbildung 5-1) aus dem Softwarepaket „SGSS“. Die Simulationsalgorithmen wurden im Rahmen des „SX5“-Projekts entwickelt und basieren auf den Vorarbeiten von SCHÜLER E. [2008].

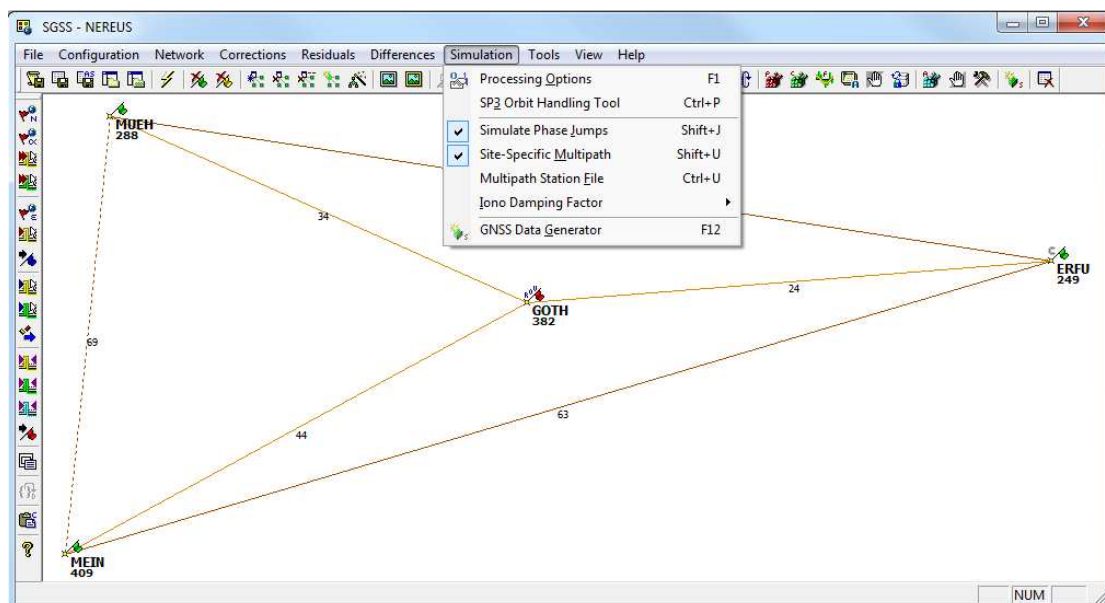


Abbildung 5-1: Simulationsmodul der Software „NEREUS“

Die Applikation „NEREUS“ wurde ursprünglich für die Erzeugung von Flächenkorrekturparametern (FKP) konzipiert. Durch eine Erweiterung der Algorithmen können mit ihr auch simulierte GNSS-Daten erzeugt werden.

5.1 Allgemeine Beschreibung der Simulation

Die Erzeugung der simulierten Daten ist im Prinzip die Umkehrung der GNSS-Positionsberechnung. Die Simulation erzeugt Daten für ein aus Referenzstationen und einem Neupunkt bestehendes Netz. Alle Fehlereinflüsse auf GNSS-Messungen müssen rückwirkend auf die simulierten Beobachtungsdaten modelliert werden. Damit werden typische Größenordnungen für die Parameter der Troposphäre, Ionosphäre und der Mehrwegeausbreitung eingestellt (siehe Abbildung 5-2). Die Beobachtungsprinzipien sowie die Empfänger-Bandbreite werden in der Simulation mit berücksichtigt. Für die Zwecke dieser Arbeit werden nur statische und semi-

statische Beobachtungsdaten generiert. Die Daten enthalten alle Informationen, die in einer normalen RINEX-Datei zu finden sind.

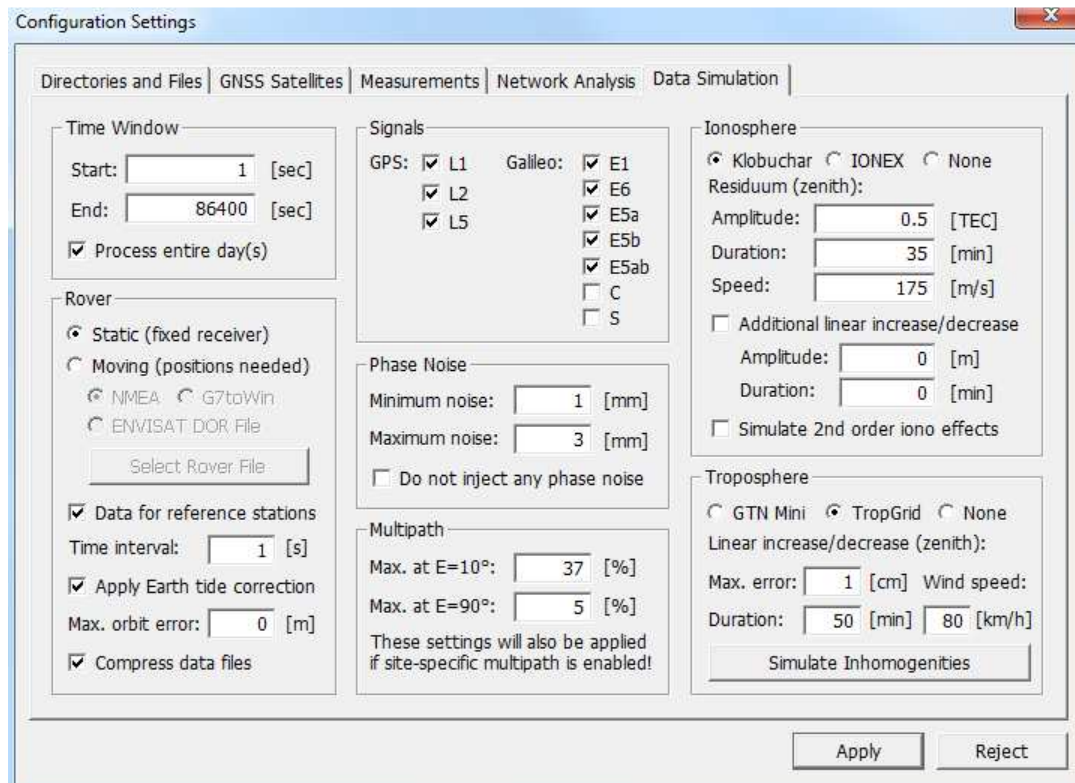


Abbildung 5-2: Konfigurationsparameter zur Generierung von simulierten GNSS-Beobachtungsdaten

Die zeitliche Auflösung der simulierten Daten wird durch den Nutzer festgelegt. Die Datenrate, die Art der Beobachtung und die Modellverbesserung hängen von den Anforderungen der zu analysierenden Anwendung ab.

GPS			
Signale	Frequenz [MHz]	Modulation	Bandbreite (MHz)
L1	1575,42	BPSK(1)	24
L2	1227,60	BPSK(1)	24
L5	1176,45	BPSK(10)	24
Galileo			
E1	1575,42	BOC(1,1)	24
E6	1278,78	BPSK(5)	24
E5a	1176,45	BPSK(10)	24
E5b	1207,14	BPSK(10)	24
E5	1191,795	AltBoc(15,10)	51 (90)
COMPASS/BEIDOU			
B2	1191,795	AltBoc(15,10)	51 (90)

Tabelle 5-1: Simulierte Signale

Da die Beobachtungsdaten für eine schnelle präzise Positionierung verwendet werden, werden nur Beobachtungen der datenfreien Q-Kanäle der Signale generiert. Daten für die in Tabelle 5-1 aufgeführten Signale (GPS L1, L2, L5, Galileo E1, E5a, E5b, E5, E6 und COMPASS B2) werden simuliert. Offiziellen Angaben zufolge wird das COMPASS B2 die gleichen Eigenschaften wie das Galileo E5 aufweisen. Damit wird für die Simulation angenommen, dass COMPASS B2 und Galileo E5 gleich sind.

5.1.1 Berechnungsschritte der Simulation

Für die Berechnung der Epoche-zu-Epoche-Beobachtungen muss der Zeitpunkt der Übertragung des Satellitensignals bestimmt werden. Da dies nur iterativ durchgeführt werden kann, wird ein Anfangswert von $t_{Sat} = t - 0.067 \text{ sec}$ angenommen. Der Empfänger-Uhrfehler δ_{Rec} wird auf Null gesetzt, was im Falle der hier angewandten doppelten Differenzierungs-Strategie kein Problem darstellt. Mit dieser Information können die Positionen der Satelliten zum Zeitpunkt der Übertragung des Signals berechnet werden. Eine Unterscheidung zwischen dem Satelliten-Massenzentrum, wie es von SP3-Orbitdaten dargestellt wird, und dem Antennenphasenzentrum, wie es von Broadcast-Ephemeriden abgebildet wird, über den Ursprung der Satellitenkoordinaten wird in der Simulation nicht gemacht, da sie keinen Vorteil für die Erzeugung der simulierten Beobachtungsdaten bringt.

Die Satellitenkoordinaten zur Zeit der Aussendung des Signals werden im ECEF (Earth Centered Earth Fixed)-Koordinatensystem berechnet. Da sich die Erde mit einer Geschwindigkeit von $\omega_E = 7.2921151467 \cdot 10^{-5} \text{ rad} / \text{s}$ während der Laufzeit t_{SIG} dreht, müssen die berechneten Satellitenkoordinaten mit einem Winkel von α um die z-Achse gedreht werden:

$$\begin{aligned} X &= X' \cdot \cos \alpha + Y' \cdot \sin \alpha \\ Y &= Y' \cdot \cos \alpha - X' \cdot \sin \alpha \quad \text{with } \alpha = (t - t_{SAT}) \cdot \omega_E \\ Z &= Z' \end{aligned} \quad (5-1)$$

Dann wird eine Korrektur der Signallaufzeitverzögerungen durch die Ionosphäre und die Troposphäre unter Verwendung von a priori-Korrektur-Modellen berechnet. Somit können die Code- und Phasenbeobachtungen unter Verwendung der Gleichungen (2-5) und (2-6) abgeleitet werden.

$$PR = S - \delta t_{SAT} \cdot c + \delta S_{IONO} + \delta S_{TROP} \quad (5-2)$$

$$\varphi = (S - \delta t_{SAT} \cdot c - \delta S_{IONO} + \delta S_{TROP}) / \lambda - N \quad (5-3)$$

Als Abbruchkriterium der Iteration der Signalübertragungszeit t_{Sig} wird 1 mm eingesetzt. Der Wert des Mehrdeutigkeitsterms N kann beliebig sein, aus praktischen Gründen wird er in dieser Studie jedoch auf Null gesetzt. Nach dieser Iteration werden andere Fehler hinzugefügt. Die Hauptfehlereinflüsse sind Empfänger-Rauschen, Multipath-Effekte sowie zusätzliche ionosphärische und troposphärische Laufzeitverzögerungen. Da der Azimut und die Elevation des beobachteten Satelliten i an einer Station A für die weiteren Berechnungen gebraucht werden, sind die Gleichungen zu ihrer Berechnung hier angegeben:

$$S_A^i = \left| \vec{X}^i - \vec{X}_A \right| = \sqrt{\Delta X_A^i{}^2 + \Delta Y_A^i{}^2 + \Delta Z_A^i{}^2} \quad (5-4)$$

$$\cos z_A^i = \frac{\cos \varphi_A \cdot \cos \lambda_A \cdot \Delta X_A^i + \cos \varphi_A \cdot \sin \lambda_A \cdot \Delta Y_A^i + \sin \varphi_A \cdot \Delta Z_A^i}{S_A^i} \quad (5-5)$$

$$\tan A_A^i = \frac{-\sin \lambda_A \cdot \Delta X_A^i + \cos \lambda_A \cdot \Delta Y_A^i}{-\sin \varphi_A \cdot \cos \lambda_A \cdot \Delta X_A^i - \sin \varphi_A \cdot \sin \lambda_A \cdot \Delta Y_A^i + \cos \varphi_A \cdot \Delta Z_A^i} \quad (5-6)$$

5.1.2 Simulation der Satellitenbahndaten

Die simulierten Beobachtungsdaten werden mittels SP3-Orbitdaten in der Applikation „NEREUS“ gewonnen. Da Satellitenkoordinaten und Uhrfehler in diesen Dateien in einem 15-Minuten-Intervall bereitgestellt werden, können Zwischenwerte der Intervalle mit einem Polynom des Grads 18 interpoliert werden. PRESS et al. [1992] beschreiben detailliert, wie eine solche Interpolation durchgeführt wird. Zur Generierung der GPS-Bahndaten können präzise SP3-Dateien von IGS verwendet werden, die öffentlich durch verschiedene Analysenzentren (CDDIS, BKG etc.) zur Verfügung gestellt werden. Alternativ können für die Berechnung der ECEF-Satellitenkoordinaten Broadcast-Ephemeriden durch eine Konvertierung in das geeignete SP3-Format herangezogen werden. Für die Galileo-Satellitenbahnen wird bei der Simulation ein auf PIRIZ et al. [2005] basierender Almanach verwendet. Auch COMPASS-Bahnen nutzen einen Almanach, der ausgehend von Informationen auf der COMPASS-Projektseite (<http://www.beidou.gov.cn/>) berechnet wurde.

Die Schritte der Bahndaten-Simulation werden hier am Beispiel der Galileo-Satelliten detaillierter beschrieben. Die Galileo-Konstellation ist eine Walker 27/3/1-Konstellation, deren Bahnparameter im Abschnitt 1.2 angegeben wurden. Der Wert für die Exzentrizität e aller Galileo-Bahnen wird in dieser Simulation auf 0 gesetzt. Abbildung 5-3 beschreibt eine Satellitenbahn mit den Kepler-Parametern.

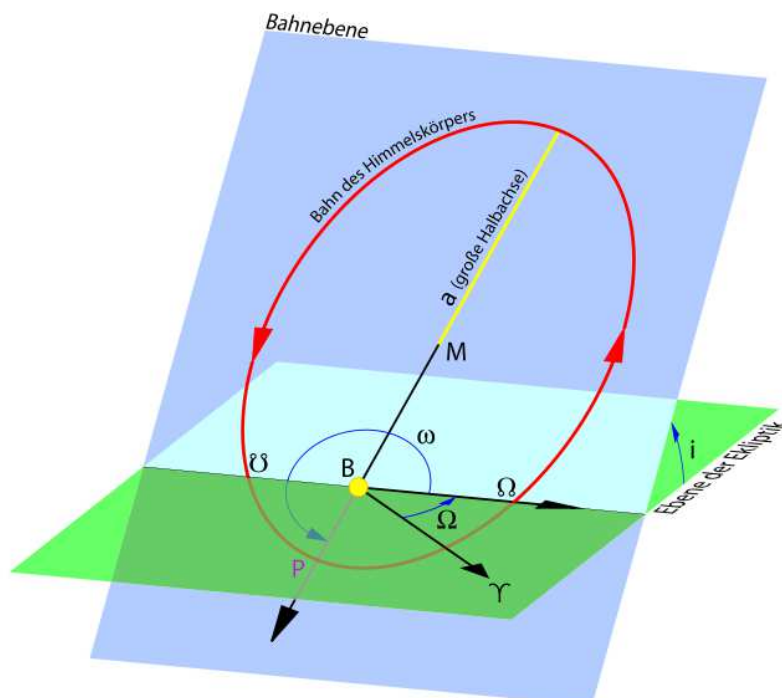


Abbildung 5-3: Orientierung einer Satellitenbahn, beschrieben durch Kepler-Parameter, Quelle: wikipedia: gezeichnet am 10. Februar 2004 von ArtMechanic; letzter Aufruf 03.12.2012

Die wichtigsten Schritte für die Berechnung der kartesischen ECEF-Koordinaten der Satelliten aus Almanach-Daten sind hier zusammengestellt; weiterführende Beschreibungen finden sich z.B. bei SEEBER [1989] und BAUER [2003]:

- Almanach-Daten werden für den Referenzzeitpunkt t_0 gegeben, um die Koordinaten zu einem beliebigen Zeitpunkt t zu berechnen; die Zeitdifferenz wird als $t_k = t - t_0$ bezeichnet.
- Die mittlere Winkelgeschwindigkeit n des Satelliten wird mit berechnet,

$$n = \sqrt{\frac{GM_E}{a^3}} \quad (5-7)$$

wobei G die Gravitationskonstante ist, M_E die Masse der Erde und a die große Halbachse.

- Die mittlere Anomalie M für t_k beträgt

$$M_k = M_0 + n \cdot t_k \quad (5-8)$$

- Mit einer Iteration (nicht notwendigerweise mit $e=0$) kann die exzentrische Anomalie E_k von M_k berechnet werden:

$$E_k = M_k + e \cdot \sin E_k \quad (5-9)$$

- Die wahre Anomalie ergibt dann:

$$\tan v_k = \frac{\sqrt{1-e^2} \cdot \sin E_k}{\cos E_k - e} \quad (5-10)$$

- Das Argument der Breite ist $\Phi_k = v_k - \omega$, mit ω als das gegebene Argument des Perigäums.
- Mit der momentanen Entfernung des Satelliten zum Zentrum der Erde $r_k = a \cdot (1 - e \cdot \cos E_k)$ und der momentanen Rektaszension des aufsteigenden Knotens $\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \omega_E) \cdot t_k - \omega_E \cdot t_{0e}$ können die Koordinaten des Satelliten in der Bahnebene berechnet werden:

$$X'_k = r_k \cdot \cos \Phi_k \quad Y'_k = r_k \cdot \sin \Phi_k \quad (5-11)$$

Und schließlich werden die ECEF-Koordinaten wie folgt abgeleitet:

$$\begin{aligned}
X_k &= X'_k \cdot \cos \Omega_k - Y'_k \cdot \sin \Omega_k \cdot \cos i \\
Y_k &= X'_k \cdot \sin \Omega_k - Y'_k \cdot \cos \Omega_k \cdot \cos i \\
Z_k &= Y'_k \cdot \sin i
\end{aligned} \tag{5-12}$$

5.1.3 Modellierung der Fehlereinflüsse auf die Simulation

5.1.3.1 Modellierung des Beobachtungsrauschens

Der Begriff "Beobachtungsrauschen" fasst alle Fehler in Bezug auf den Empfänger mit Ausnahme externer Fehlerquellen, wie z.B. Multipath-Effekte, zusammen. Hier wird davon ausgegangen, dass diese Fehlereinflüsse normalverteilt und nicht zeitlich korreliert sind. Diese Vereinfachung wird mit der Tatsache begründet, dass empfängerbezogene Fehler z.B. im Vergleich zu Multipath- und Atmosphärenfehlern relativ klein sind. In der Simulation wird zwischen dem Code- und Trägerphasenmessrauschen unterschieden. In beiden Fällen ist die Modellierung von der Elevation abhängig - somit wird das minimale Rauschen für Beobachtungen in Zenitrichtung aufmodelliert. Die Modellierung wird zwischen den Satelliten als unkorreliert angenommen und das Rauschniveau wird für jedes Signal unterschiedlich verarbeitet.

Für die Trägerphasenrauschvariablen werden die Minimal- und Maximalwerte q_{\min} (90°) und q_{\max} (10°) der Elevation festgelegt. Dann wird die Gleichung (5-7) für das Trägerphasenrauschen berechnet und der resultierende Wert mit einer anderen Zufallsvariable für jeden Satelliten, jedes Signal und jede Epoche skaliert.

$$q = m \cdot E[\text{rad}] + n \quad \text{with} \quad m = \frac{q_{\min} - q_{\max}}{\frac{4}{9}\pi} \quad \text{and} \quad n = \frac{9}{8}q_{\max} - \frac{1}{8}q_{\min} \tag{5-13}$$

Für q_{\min} und q_{\max} werden erfahrungsgemäß Werte von 1 mm und 3 mm eingeführt.

Die Modellierung des Coderauschens ist stark von der Elevation des jeweiligen Satelliten abhängig; in der Simulation werden die minimalen und maximalen Werte festgesetzt. PRATT et al. [2006] leiten eine elevationsabhängige Exponentialfunktion für die Erzeugung von Coderauschen ab:

$$q = e^{-2,21 \cdot E[\text{rad}] + 0,72} + 0,14 \tag{5-14}$$

Danach werden Werte des Träger-Rausch-Verhältnisses (C/N_0) für die jeweilige Elevation und für jedes Signal zugeordnet.

5.1.3.2 Modellierung der Multipath-Einflüsse

Das Thema Multipath-Fehler wurde ausführlich in Abschnitt 3.2.4 behandelt und die Größenordnung dieses Fehlers für Galileo E5 bestimmt. Dabei wurde festgestellt, dass Codestreckenmessungen zu einem höheren Grad von Multipath beeinflusst werden. Diese Tatsache erschwert bei der CPC-Kombination die Mehrdeutigkeitslösung. Die Garantie der bestmöglichen Datensimulation setzt eine realistische Simulation der Mehrwegeausbreitung voraus. Hierfür wird ein Simulationsansatz verfolgt, der am

besten als „semi-empirisch“ beschrieben werden kann, da er sowohl empirische als auch theoretisch berechnete Daten enthält.

Im Simulationsprozess werden in einem ersten Schritt durch Analysen mit dem Vorprozessierungstool „TEQC⁵⁵“ typische GPS L1-Multipath-Werte für verschiedene Stationen aus dem EUREF-Netz bestimmt (siehe Tabelle 5-2). Multipath-Werte, die in der Tabelle über 0,5 m (rot markiert) liegen, werden als kritische Werte angenommen, da sie auf einen großen Multipath-Einfluss auf die Station hindeuten. Anhand der GPS L1-Multipath-Werte werden mittels Skalierungsfaktoren die Werte für andere GNSS-Signale interpoliert.

Stationen	Mittlerer Multipath-Fehler RMS [m]	Mittlere Elevation [°]
AQUI	0,109	41,13
AUTN	0,181	41,12
BRUS	0,661	41,02
BZRG	0,118	42,06
CAGZ	0,354	40,35
GLSV	0,104	39,28
HELG	0,261	39,13
KLOP	0,300	40,68
KRAW	0,563	40,27
MARS	0,251	42,32
MATE	0,202	41,33
NICO	0,125	39,46
NOA1	0,179	40,49
NOT1	0,088	41,24
OROS	0,353	40,23
OSLS	0,123	39,25
ONSA	0,217	42,32
POTS	0,607	41,44
PTBB	0,689	42,92
SASS	0,231	39,51
SOFI	0,254	40,60
STAS	0,234	41,83
TDRS	0,142	38,98
TLSE	0,198	40,56
TORA	0,134	36,89
VALA	0,098	41,22
VALE	0,249	41,30
WROC	0,086	40,18
WTZR	0,156	40,70
ZIMM	0,294	41,17

Tabelle 5-2: Typische Werte für GPS L1-Multipath-Fehler an verschiedenen EUREF-Stationen

Das Multipath-Signal kann dann durch eine Fourier-Analyse in seine Frequenzanteile zerlegt werden. Um die signifikanten Multipath-Anteile vom Rauschen zu trennen, wird das Spektrum in 72 signifikante Wellenformen mit den Frequenzen $\omega_i = 2\pi \cdot f_i$ und den Amplituden A_i geteilt. Abbildung 5-4 zeigt die Ausgabe dieser Analyse. Die Amplituden sind so skaliert, dass das Multipath-Signal $\sum_i A_i \cos(\omega_i \cdot t + \varphi)$ auf den

⁵⁵ „TEQC“ ist ein einfaches, aber leistungsfähiges und einheitliches Tool zur Lösung vieler Vorprozessierungs-Probleme von GPS-, GLONASS-, Galileo- und SBAS-Daten; siehe <http://facility.unavco.org/software/teqc/teqc.html>, letzter Aufruf 04.12.2012.

sog. „Ionospheric Pierce Point (IPP)“, der als der Schnittpunkt der Sichtlinie zwischen einem Satelliten i , einer Beobachtungsstation A und der Ionosphärenschicht definiert ist. Aus diesem Grund werden die Berechnungen mit den Koordinaten des IPP durchgeführt.

Die angenommene Modellschicht der Ionosphäre liegt bei einer Höhe h_I , die eine mittlere Höhe der Ionosphäre bei etwa 300 bis 500 km darstellt. Unter Verwendung des Zenitwinkels z_A^i (Gleichung (5-5)) kann der Zenitwinkel zwischen dem IPP und dem Satelliten i berechnet werden:

$$\sin z_{IP}^i = \frac{R_E + h_A}{R_E + h_{ION}} \cdot \sin z_A^i \quad (5-15)$$

Mit den Zenitwinkeln z_A^i und z_A^{IPP} und dem Azimut A_A^i (Gleichung (5-5)) können die Koordinaten des IPP dann berechnet werden:

$$\sin \varphi_{IP}^i = \sin \varphi_A \cdot \cos(z_A^i - z_{IP}^i) + \cos \varphi_A \cdot \sin(z_A^i - z_{IP}^i) \cdot \cos A_A^i \quad (5-16)$$

$$\lambda_{IP}^i = \lambda_A + \arcsin\left(\frac{\sin(z_A^i - z_{IP}^i) \cdot \sin A_A^i}{\cos \varphi_{IP}^i}\right) \quad (5-17)$$

Die ionosphärische Störung wird durch eine so genannte „Travelling Ionospheric Disturbance (TID)“, eine Sinus-Welle, simuliert, die sich in Nord-Süd-Richtung bewegt (Abbildung 5-6):

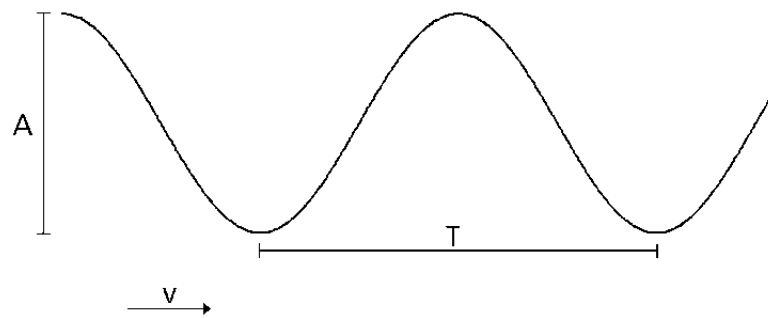


Abbildung 5-6: Simulationsparameter der TID

Eine ausgewählte Referenzstation des simulierten Netzes wird festgelegt. Damit wird definiert, dass die Welle während der Epoche t der Simulation an dieser Referenzstation beginnt. Für die Referenzstation sowie für die Rover-Station wird die Breite des IPP für jeden Satelliten berechnet, woraus sich die Differenz von Breitengraden $\Delta\varphi$ ergibt:

$$\Delta\varphi^j = \varphi_{IP,REF}^j - \varphi_{IP,SIM}^j \quad (5-18)$$

Die Amplitude der Sinuswelle, die Laufgeschwindigkeit und die Periode können beliebig gewählt werden. Die Signallaufzeitverzögerung, die durch die TID in

Zenitrichtung an der Rover-Station verursacht wird, kann dann wie folgt ermittelt werden:

$$IONO = A \cdot \cos(\omega \cdot t^*) \quad \text{with} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}, \quad t^* = t + \Delta t, \quad \Delta t = \frac{\Delta\varphi}{v} \quad (5-19)$$

Schließlich wird dieser Wert in Richtung der jeweiligen Satelliten mit der Klobuchar-Abbildungsfunktion ausgeglichen. Um zusätzlich eine signifikante Veränderung der ionosphärischen Laufzeitverzögerung in kurzer Zeit zu simulieren, kann zu der Sinuswelle des Modells ein linearer Trend hinzugefügt werden.

5.1.3.4 Modellierung der troposphärischen Einflüsse

Die Simulation der troposphärischen Störung wird als Bewegung einer Wetterfront dargestellt. Die Bewegung wird als eine Sägezahnwelle in West-Ost-Richtung angenommen, wie sie Abbildung 5-7 darstellt, und verwendet eine westwärtige Windrichtung.

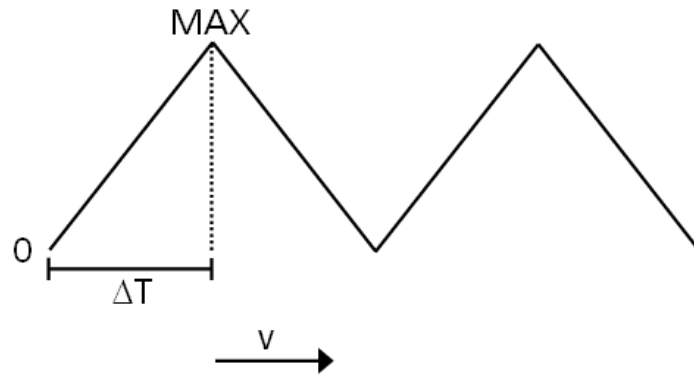


Abbildung 5-7: Simulationsparameter der troposphärischen Störung

Zunächst wird der troposphärische Restfehler bei einer der Referenzstationen auf Null gesetzt. Dementsprechend muss für die anderen Stationen ein Zeitversatz berechnet werden. Der maximale troposphärische Restfehler in Zenitrichtung MAX , der Zeitversatz ΔT und die Laufgeschwindigkeit v können beliebig gewählt werden. Um die troposphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung $TROP$ zu erhalten, muss die jeweilige Zeit t für die bestimmte Station berechnet werden, wobei t zwischen 0 und $2\Delta t$ liegen muss:

$$\begin{cases} TROP = m_1 \cdot t + n_1 & \text{with } m_1 = \frac{MAX}{\Delta T} & n_1 = 0 & \text{if } t \leq \Delta T \\ TROP = m_2 \cdot t + n_2 & \text{with } m_2 = -\frac{MAX}{\Delta T} & n_2 = 2 \cdot MAX & \text{if } t > \Delta T \end{cases} \quad (5-20)$$

Anschließend wird die Verzögerung in Richtung des Satelliten unter Verwendung einer Abbildungsfunktion berechnet, die nur von der Elevation abhängt, KLOBUCHAR [1996]:

$$m(E) = \frac{1,001}{\sqrt{0,001^2 + 0,002 + \sin^2 E}} \quad (5-21)$$

SCHÜLER E. [2008] führte ein Experiment durch, um einen Einblick in das Ausmaß dieser Art von troposphärischen Störungen in Mitteleuropa zu erhalten. Wählt man die von ihr erhaltenen Maximalwerte und nimmt realistische Werte für den atmosphärischen Druck, die Temperatur und die relative Feuchte an, werden maximale Änderungen der troposphärischen Verzögerungen in Zenitrichtung von etwa 5 cm erreicht. Da die Werte in Intervallen von 15 Minuten erhalten wurden, kann man davon ausgehen, dass der Anstieg des ZPD von 5 cm in einem kleineren Zeitintervall als 60 Minuten erfolgt. Als Fazit kann festgehalten werden, dass der ZPD-Wert sich in mittleren Breiten im Zusammenhang mit einer Wetterfront in einem Zeitraum von 45 bis 60 Minuten bis zu drei Mal etwa um 4 bis 5 cm ändern kann.

5.2 Generierung der simulierten Daten

Die mangelnde Verfügbarkeit einer ausreichenden Anzahl von Galileo-Satelliten zur Berechnung von präzisen Positionen stellt zum jetzigen Zeitpunkt eine gewisse Einschränkung für die Analyse der Güte der Galileo-E5-Einfrequenz-Positionierungsmethoden dar. Deswegen soll die Simulation der GNSS-Daten diesen Mangel so gut wie möglich beseitigen. Zur Sicherung der Qualität der simulierten Daten werden für verschiedene IGS-, EUREF- bzw. lokale Stationen weltweit für eine Beobachtungsperiode von einem Jahr (GPS-Woche 1669, DoY: „Day of Year“-001 bis GPS-Woche 1723 DoY-365) GNSS-Daten generiert.

Um fundierte Aussagen über den Verlauf der Genauigkeit der simulierten Daten treffen zu können, werden tägliche Datenpakete generiert und prozessiert. Die Auflösung der prozessierten Daten kann auf sechsstündige Datenpakete und schließlich auf nur einstündige Datenpakete reduziert werden, um kurzzeitige Variationen bzw. kurzzeitiges Verhalten der simulierten Daten zu analysieren.

Für die späteren Testzwecke werden Beobachtungsdaten nur für bestimmte GNSS-Frequenzen (GPS-Frequenzen L1, L2 und L5 und Galileo-Frequenzen E1, E5a, E5b, E5) erzeugt. In Folge der Annahme, dass COMPASS B2 die gleichen Eigenschaften wie Galileo E5 hat, werden aus der COMPASS-Satellitenkonstellation E5-Daten generiert und als B2-Daten betrachtet. Alle simulierten GNSS-Daten sind im RINEX 3.0-Format gespeichert.

5.2.1 Überprüfung der simulierten Daten mit einer unabhängigen Software

Um sicherzustellen, dass die simulierten Daten die "Realität" in ausreichendem Maße repräsentieren, werden mit Hilfe einer unabhängigen Applikation, der BERNESE⁵⁶-Software, eigenständige Prozessierungen der Daten durchgeführt (siehe Abbildung 5-88 und Abbildung 5-89).

⁵⁶ Die Bernese GPS-Software ist ein Programmsystem zur Auswertung von GNSS-Satellitenbeobachtungen. Es dient einerseits zur Bahnbestimmung dieser Navigationssatelliten, andererseits zur präzisen Positionsbestimmung. Zusätzlich ermöglicht es die Berechnung von Modellen der Erdatmosphäre, der Erdrotation und anderer erdbezogener Parameter (siehe Bernese User Manual 5.0, <http://www.bernese.unibe.ch/docs50/DOCU50.pdf>)

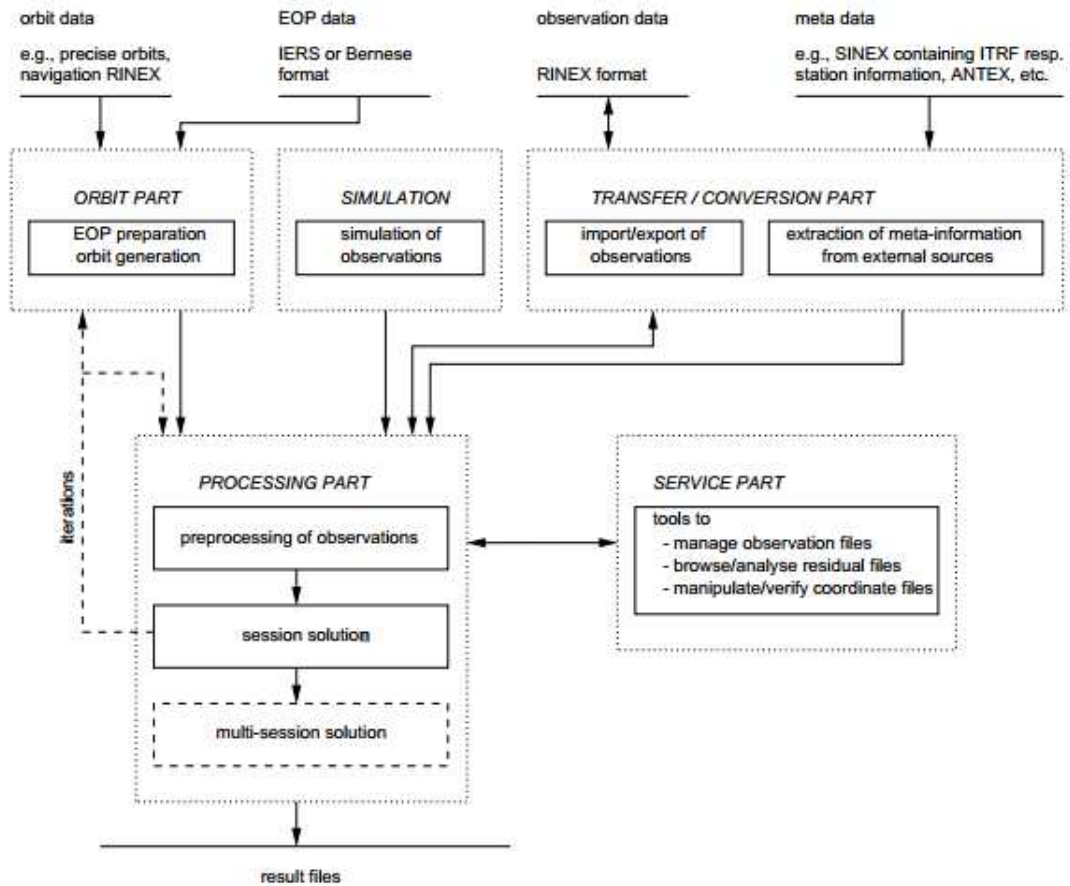


Abbildung 5-8: Funktionales Flussdiagramm der Standardprozessierung mit der Bernese-Software, Bernese User Manual 5.0 (<http://www.bernese.unibe.ch/docs50/DOCU50.pdf>)

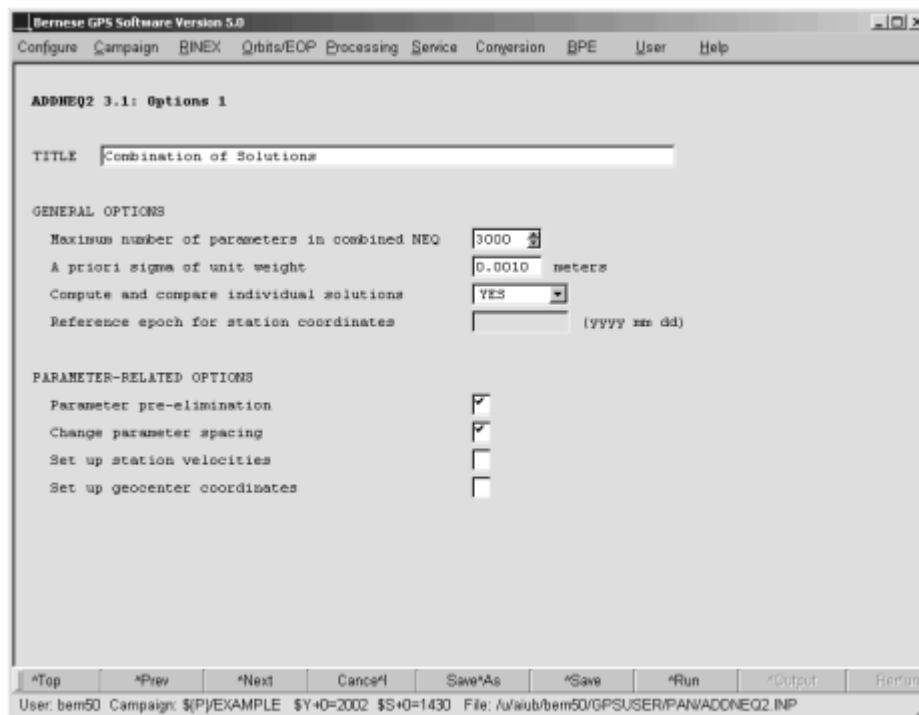


Abbildung 5-9: Bernese-Applikation ADDNEQ2, Bernese User Manual 5.0
(<http://www.bernese.unibe.ch/docs50/DOCU50.pdf>)

Es werden simulierte GPS L1-Codestrecken- und Trägerphasendaten aus den Testnetzen im Bereich mittlerer Breiten (IGS-Station BRUS) und in der Polregion (IGS-Station OSLS) prozessiert (siehe Abbildung 5-810).

Die Daten werden mit einer Datenrate von 5 s für die GPS-Tage (DoY) 001/2012, 060/2012 und 160/2012 generiert. Ionosphärische und troposphärische Refraktionsfehler werden in den Simulationsdaten abgebildet. Das Ziel dieser Überprüfung ist es, die Koordinaten der Stationen BRUS und OSLS mit herkömmlichen GNSS-Positionierungsverfahren (Trägerphasenprozessierung) zu bestimmen und die Ergebnisse der simulierten Daten mit denjenigen von Realdaten zu vergleichen.



Abbildung 5-10: Netz im mittleren Breiten-Bereich (links) und in der Polregion (rechts) und ihre Referenzstationen

Die für die Analyse verwendeten präzisen Bahndaten werden ebenfalls simuliert - ihre Qualität entspricht derjenigen der IGS-„Final Orbit“-Sp3-Daten. Für jedes Netz werden drei unabhängige Basislinien genutzt, um die Stationskoordinaten zu

berechnen. Das Bezugssystem der Koordinaten ist durch die Koordinaten der Referenzstationen (AUTN, HELG und KLOP für das mittlere Breiten-Netz und ONSA, STAS und TRD für die Polregion) im RINEX-Header festgelegt.

Die IGS-/EUREF-Realdaten haben ein Intervall von 30 s. Um einen realistischen Vergleich mit den simulierten Daten durchführen zu können, werden die simulierten Daten vor der Datenanalyse ebenfalls auf ein Intervall von 30 s reduziert. Es werden relative Trägerphasenmessungen aus L1 berechnet. Die Koordinaten von BRUS und OSLs werden über die Festsetzung der Referenzkoordinaten (die sog. „constraints“) prozessiert.

5.2.2 Ergebnisse der Datenverifikation

Die Tabelle 5-3 zeigt die Differenz zwischen den Ergebnissen, die aus der Prozessierung der Realdaten und der simulierten Daten erhalten wurden.

Tag des Jahres (DoY) / Jahr	Brus		
	N [mm]	E [mm]	U [mm]
008/2012	0,7	-1,1	-0,9
068/2012	0,4	-1,4	-1,5
160/2012	0,5	-1,9	-0,2

Tabelle 5-3: Koordinatenunterschied der Ergebnisse aus Realdaten und simulierten Daten

Der Unterschied zwischen den Realergebnissen und den simulierten Ergebnissen beträgt nur wenige Millimeter. Damit ist erwiesen, dass die simulierten Daten der Realität weitgehend entsprechen.

Um diese Erkenntnis zusätzlich zu stützen, werden für die Station OSLs ebenso Trägerphasenmessungen berechnet und reale und simulierte Ergebnisse miteinander verglichen. Für die Station OSLs wird die Differenz der geschätzten Koordinaten mit den a-priori-Koordinaten des RINEX-Headers berechnet (siehe Tabelle 5-4). Die Differenzen fallen sehr gering (im Submillimeter-Bereich) aus und bestätigen damit die Güte der simulierten GNSS-Daten.

Tag des Jahres (DoY) / Jahr	OSLS		
	N [mm]	E [mm]	U [mm]
008/2012	-0,3	0,6	0,6
068/2012	-0,4	0,8	0,8
160/2012	-0,4	0,7	0,7

Tabelle 5-4: Vergleich von a priori Koordinaten mit Simulationsergebnissen für die Teststation OSLs

Die Analyse zeigt, dass die simulierten Daten ausreichend genau sind und infolgedessen herangezogen werden können, um das reale Daten-Verhalten zu beschreiben.

6 Analyse der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung

In diesem Kapitel wird eine eingehende Untersuchung der Einfrequenz-Positionierungsmethoden durchgeführt. Im Mittelpunkt stehen dabei die Galileo E5-Daten. Es soll herausgefunden werden, welche besonderen Qualitäten diese aufweisen, aber auch, welche Grenzen ihnen gesetzt sind.

Die Untersuchung ist in zwei Hauptteile gegliedert:

- Die statische Bestimmung von Punktkoordinaten, die hier als Positionsbestimmung bezeichnet wird
- Die Durchführung von praktischen Anwendungsfällen der Einfrequenz-Positionierung, speziell im Bereich der Überwachung von Strukturen

Zur Durchführung der Leistungsanalyse werden die in Kapitel 4.4 beschriebenen Testszenarien prozessiert und ihre Ergebnisse interpretiert.

6.1 Analyseablauf

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die charakteristischen Eigenschaften des Galileo E5-Signals und dessen Überlegenheit in vielerlei Hinsicht im Vergleich zu anderen GNSS-Signalen (z.B. geringerer Multipath-Einfluss, geringeres Messrauschen) ausführlich dargestellt. Nunmehr stellt sich die Frage, ob diese Überlegenheit zur Erhöhung der Genauigkeit der Einfrequenz-Positionierung mit Galileo E5-Daten beiträgt. Um diese zu beantworten, werden verschiedene Positionsbestimmungs-Analysen angestellt. Dabei werden die Ergebnisse von Galileo E5 ständig mit denjenigen anderer GNSS-Signale verglichen, um die Genauigkeitsverbesserung mit E5-Daten aufzuzeigen und damit den Beweis für die bisherigen Annahmen zu führen. Hier sei nochmals erwähnt, dass die Prozessierungen aus den in Kapitel 5 genannten Gründen auf simulierten GNSS-Daten basieren.

Die Analysen sollen einerseits zeigen, inwieweit die Einfrequenz-Positionsergebnisse mit Galileo E5 im Vergleich zur Einfrequenz-Positionierung mit herkömmlichen Signalen wie GPS L1 oder L5 verbessert werden können, und andererseits untersuchen, ob die erreichten CPC-Genauigkeiten mit denjenigen der Zwei- bzw. Multifrequenz-Positionsbestimmung konkurrieren können. Bei der Bildung der doppelten Differenzen zur Berechnung der Positionslösungen ist der Zugang zu Referenzstations-Daten sicherzustellen. Es wird untersucht, über welche Basislinienlängen (kurz, mittel bzw. lang) präzise Positionsergebnisse erzielbar sind. Vor dem Hintergrund, dass kurze Basislinien eine dichte Netzinfrastruktur erfordern (hoher Kostenfaktor), sollte dem Einsatz von globalen oder kontinentalen Netzen für die präzise Einfrequenz-Positionierung der Vorzug gegeben werden. Die Stationen solcher Netze erlauben je nach Region die Bildung von mittleren bis langen Basislinien (200 bis 1000 km). Die hauptsächlichen Gründe für die Hinlänglichkeit der globalen bzw. kontinentalen Netze sind die mittlerweile hohe Genauigkeit der GNSS-Orbitdaten und die Beseitigung der ionosphärischen Laufzeitverzögerung als Teil des CPC-Verfahrens.

Die lange Konvergenzzeit bei der Einfrequenz-Positionsbestimmung stellt indessen ein Problem dar, dem mit der Mehrdeutigkeitsfixierung entgegengewirkt werden muss. Hierfür wird eine verbreitete Mehrdeutigkeitslösungs-Methode, die LAMBDA-Methode, genutzt, die aufzeigen soll, ob es unter geringem Aufwand möglich ist, die Mehrdeutigkeitssterne der Galileo E5-CPC-Messungen zu fixieren.

Wie bereits ausgeführt, wird das Galileo-System aufgrund verschiedener Verzögerungen bei dessen Entwicklung voraussichtlich erst im Jahr 2020 voll funktionsfähig sein. Deshalb werden sich Teile der Untersuchung der Fragestellung widmen, inwieweit die spärliche Satellitenkonstellation während der IOC („Initial Operational Capability“-)Phase, die sich aus nur 18 Galileo-Satelliten zusammensetzt und bis 2015 fertiggestellt sein wird, in der Lage ist, präzise Positionen zu liefern. Darüber hinaus wird beleuchtet, ob es in dieser Zeit für die präzise Positionsbestimmung von Vorteil sein wird, eine GPS-Galileo-Konstellation, bestehend aus 18 Galileo-Satelliten und acht modernen GPS IIF-Satelliten - sie strahlen das L5-Signal aus - zu verwenden.

Voraussichtlich wird die dritte Aufbauphase des chinesischen COMPASS/BeiDou-Systems etwa zur gleichen Zeit wie die „Full Operational Capability (FOC)“-Konstellation von Galileo abgeschlossen sein. Mit einer Walker-Konstellation aus 24 MEO-Satelliten wird COMPASS/BeiDou eine globale Abdeckung leisten können. Außerdem wird, wie in Unterkapitel 1.3 bereits festgestellt, das COMPASS B2-Signal dem Galileo E5 Breitband-Signal in allen Aspekten ähneln. Daher wird untersucht, ob die Kombination beider Systeme die ideale Synthese für eine optimale Positionierung mit dem AltBOC (15,10) Breitband-Signal anbieten kann.

Die Galileo-E5-Einfrequenz-Positionierung soll es ermöglichen, innerhalb von wenigen Minuten genaue Koordinaten zu erhalten. Zu diesem Zweck wurde die RCF-Methode implementiert. Ein Teil der Positionsbestimmung beschäftigt sich deshalb damit, das Genauigkeitspotential der RCF-Methode zu analysieren.

Abschließend werden die in Kapitel 4.4.3 beschriebenen Tests zur Detektion von Positionsänderungen durchgeführt. Deren Ziel ist es zu demonstrieren, dass die Galileo CPC-Methode in der Lage ist, Änderungen bzw. Deformationen in einer künstlichen oder natürlichen Struktur zu bestimmen und dabei genauere Ergebnisse zu liefern als herkömmliche GPS L1-Einfrequenz-Systeme.

Die Datenverarbeitung erfolgt mit der „SGSS eXpert“-Applikation (siehe Abbildung 6-1). Die Applikation integriert alle Funktionen (Mehrdeutigkeitslösung, Korrektur der verschiedenen physikalischen Einflüsse etc.) zur Berechnung von präzisen Positionen und bietet verschiedene Konfigurationsoptionen an. Die Nutzung der „eXpert“-Applikation setzt vertieftes Wissen über GNSS-Datenprozessierung voraus. Einige Ergebnisse werden auch durch MATLAB⁵⁷ und Microsoft Excel graphisch dargestellt und analysiert.

⁵⁷ MATLAB ist eine kommerzielle Software der Firma MathWorks Inc. zur Lösung mathematischer Probleme.

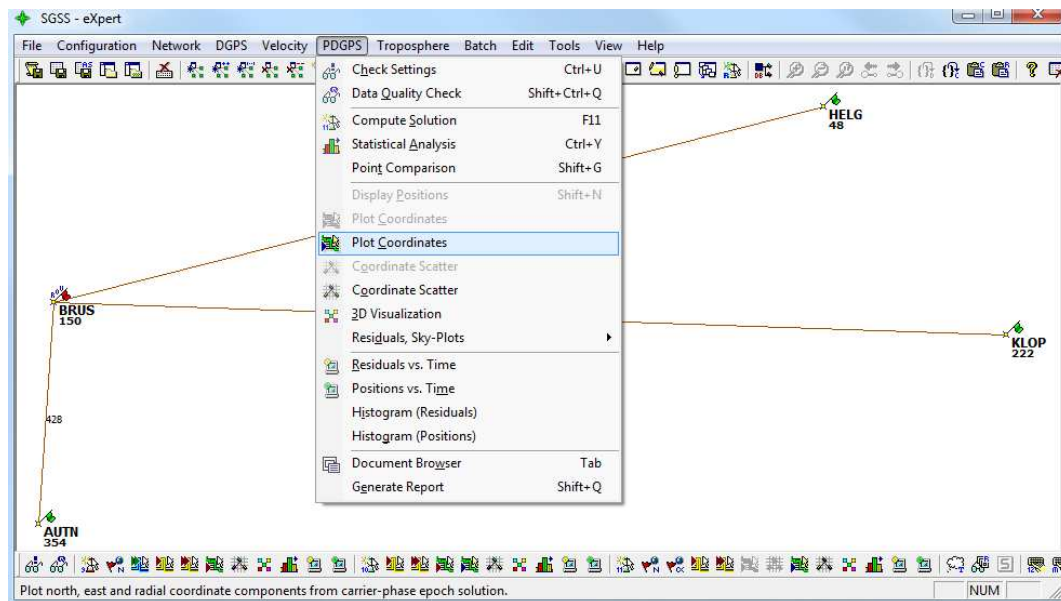


Abbildung 6-1: Prozessierungskonfiguration mit „SGSS eXpert“

6.2 Analyse der Positionsergebnisse

Um die Entwicklung der Genauigkeit der Daten zu analysieren, werden sie in verschiedenen Zeitreihen prozessiert. Die Datenaufösung beträgt 5 s und die Elevationsmaske der Satelliten ist auf 15° eingestellt, um die Auswirkungen von Multipath und atmosphärischen Restfehlern zu reduzieren. Das „TropGrid“-Modell (siehe Abschnitt 3.2.11.2.1) wird zur Mitigation der troposphärischen Effekte verwendet. In diesem ersten Prozessierungsschritt werden die Mehrdeutigkeitsterme näherungsweise mit Fließkommazahlen geschätzt, was wiederum eine längere Konvergenzzeit bis zum Erhalt der präzisen Positionsergebnisse bedeutet. Die Positionsgenauigkeit wird durch die empirische Standardabweichung des arithmetischen Mittelwertes ausgedrückt. Um eine bessere Vorstellung über das Fehlerbudget zu erhalten, wird das 3D-RMS („Root Mean Square“) ⁵⁸ aus den Standardabweichungen der drei Koordinatenkomponenten ermittelt.

6.2.1 Anpassung des stochastischen Modells

Es ist bekannt, dass empirisch abgeleitete Genauigkeitsschätzungen aus Analysen von GNSS-Daten dazu neigen, zu optimistisch zu sein (siehe KASHANI et al. [2004]). Dies wird auch für die Einfrequenz-Positionsergebnisse aus simulierten Daten erwartet. Der Hauptgrund für das Auftreten dieses Problems liegt in der Unvollkommenheit des stochastischen Modells. Insbesondere wird die physikalische Korrelation der GNSS-Daten im stochastischen Modell nicht richtig widerspiegelt. Dieser physikalische Zusammenhang kann ein dominierendes Merkmal werden und die algebraische Korrelation, die durch die doppelte Differenzenbildung auftritt, überschreiben. Daher müssen geeignete Methoden entwickelt werden, um eine auf Modellannahmen basierende realistische Fehlerschätzung zu gewährleisten.

⁵⁸ Das RMS („Root Mean Square“) ist eine Methode zur Mittelwert-Bildung der Fehler einer Messreihe. Dabei haben größere Werte einen stärkeren Einfluss als kleinere.

In der Prozessierungssoftware „eXpert“ ist die Hauptquelle der physikalischen Korrelation mit den Multipath-Effekten verbunden. Die Multipath-Effekte variieren jedoch mit der Zeit in Abhängigkeit von der GNSS-Satellitenkonstellation, die sich auch relativ verändert. Da Multipath-Fehler Codestreckenmessungen mehr beeinflussen als Trägerphasenmessungen, ist die Problematik der physikalischen Korrelation beim CPC-Ansatz kritischer zu sehen als bei der Trägerphasenprozessierung. Im Fall vom Galileo E5 ist das Signal bekanntermaßen weniger von Mehrwegeausbreitungen beeinflusst, dennoch wird die physikalische Korrelation noch in den Daten vorhanden sein.

Vorprozessierungen von simulierten Daten wiesen ab einem Beobachtungszeitraum von etwa drei Stunden zu optimistische Fehlerwerte auf. Dies wird ersichtlich, wenn die Positionierungsergebnisse aus realen GPS L1-Daten mit denen aus simulierten Daten verglichen werden. Die Analyse der Ergebnisse zeigt, dass der Unterschied zwischen den Fehlern der realen und der simulierten GPS-L1-Daten bis zu einem Skalierungsfaktor von 2 reicht. Folglich wird ein Mechanismus implementiert, um:

- die Menge der Autokorrelation in den Daten wieder herzustellen
- geeignete Nivellierungsfaktoren zu finden
- und die Varianz- bzw. Kovarianzmatrix des GNSS-Parametervektors zu justieren

Dieser stochastische Optimierungsprozess basiert auf einer Zeitreihenanalyse der Epoche-zu-Epoche-Positionslösung in der „eXpert“-Software. Zur Vereinfachung der Berechnungen beschränkt sich der Algorithmus auf die Formel des 3D-Abstands d (siehe Gleichung 6-1), die den Beitrag aller drei Koordinatenkomponenten enthält. Der hier verwendete Ansatz wurde bereits 1969 von TAUBENHEIM [1969] für die Analyse von meteorologischen Zeitreihen beschrieben. Die Koordinatenwerte werden zum Zeitpunkt $t_{1,2,\dots,n}$ ausgedrückt als:

$$d(t_1), d(t_2), d(t_3), \dots, d(t_n) \quad (6-1)$$

Es wird angenommen, dass die wahren Werte μ gleich den Erwartungswerten E sind:

$$\mu(t) = E\{d(t)\} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n d(t_i) \right) \quad (6-2)$$

Dabei ist n die Anzahl der Messungen. Die Varianz beträgt:

$$\sigma^2(t) = E\{(d(t) - \mu(t))^2\} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n [d(t_i) - \mu(t_i)]^2 \right) \quad (6-3)$$

In diesem Fall erhält man den wahren Wert μ durch eine Langzeitausgleichung der Daten oder aus einer EUREF- oder IGS-Koordinatensystem-Lösung (SINEX-Lösungsdatei). Die zugehörige Autokovarianz-Funktion kann nun folgendermaßen berechnet werden:

$$C(t, \tau) = E\{[s(t) - \mu(t)] \cdot [s(t + \tau) - \mu(t + \tau)]\} \wedge C(t, 0) = \sigma^2(t) \quad (6-4)$$

Dabei stellt τ das zeitliche Inkrement dar. Die empirische Funktion ergibt:

$$C(k) = \frac{1}{n-k-1} \cdot \sum_{i=1}^{n-k} [(d_i - d_0) \cdot (d_{i+k} - d_0)] \quad \wedge \quad \tau = k \cdot \Delta t \quad (6-5)$$

Hierbei steht n für die Anzahl der Messungen und k für eine Inkrementation (0, 1, 2, ...). Der Wert d_0 wird in der Weise ausgewählt, dass er sich dem Erwartungswert in ausreichendem Maße annähert. Die Autokorrelations-Funktion (ACF) kann wie folgt ermittelt werden:

$$R(k) = \frac{C(k)}{C(0)} \quad (6-6)$$

Ihre Werte liegen im Intervall [-1 ... +1]. Die ACF wird nun verwendet, um die tatsächliche Anzahl der stochastisch unabhängigen Messungen (auch als „effektive Messwertanzahl“ bezeichnet) zu berechnen:

$$n_{EFF} = \frac{n}{1 + 2 \cdot \sum_{k=1}^m \frac{n-k}{n} \cdot R(k)} \quad (6-7)$$

In einer gewöhnlichen Zeitreihenanalyse wird die Schätzung der empirischen Standardabweichung des arithmetischen Mittelwerts nicht mehr mit der Gleichung

$$s_{\Delta N} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n v_k^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (6-8)$$

berechnet, sondern mit der Gleichung:

$$s_{\Delta N} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n v_k^2}{n_{EFF} \cdot (n-1)}} \quad (6-9)$$

Diese ergibt einen realistischeren Wert. Dabei ist n_{EFF} erfahrungsgemäß deutlich kleiner als n . Die „effektive Messwertanzahl“ bezeichnet die Schlüsselmenge, die ermittelt werden muss, um das stochastische Modell auf ein realistisches Niveau zu stufen. Die Standardabweichung spiegelt nun die Realität besser wider. Für die Ableitung der empirischen Korrelationsfunktionen mit ausreichender Genauigkeit kommen Hochfrequenz-Daten zum Einsatz. Die Datenauflösung sollte mindestens 1 Hz betragen.

Darüber hinaus muss die Beobachtungszeitreihe ausreichend lang sein (mindestens 3 Stunden). Aus diesen Zahlen kann die Dekorrelationszeit für die Codestrecken- und Trägerphasenmessungen berechnet werden (für 1 Hz-Daten entspricht n_{EFF}

numerisch der Dekorrelationszeit). Die endgültigen Werte dieser Versuche sind in Tabelle 6-1 zusammengefasst.

Signal	Dekorrelationszeit der Codestreckenmessungen [sec]	Dekorrelationszeit der Trägerphasenmessungen [sec]
GPS L1 (real)	100	50
GPS L1 (synthetisch)	75	50
GPS L5 (synthetisch)	50	50
Galileo E5 (synthetisch)	50	25

Tabelle 6-1: Mit der Autokorrelations-Funktion (ACF) der „eXpert“-Software bestimmte Dekorrelationszeit

Die Positionsberechnung mit dem angepassten stochastischen Modell soll nun bei weitem realistischere Standardabweichungen des arithmetischen Mittels ergeben. Diese Annahme wird hier durch den Vergleich der Standardabweichungen zwischen GPS L1-Realdaten und synthetischen Daten überprüft (siehe Abbildung 6-2). Wird ein Skalierungsfaktor zwischen den beiden Datensätzen errechnet, erreicht dieser nur noch durchschnittlich 1,06, was sehr nah am Optimum 1,0 liegt. Somit ist nun ersichtlich, dass die simulierten Daten auch für längere Beobachtungszeiten (> 3 Stunden) die Realität sehr gut abbilden,.

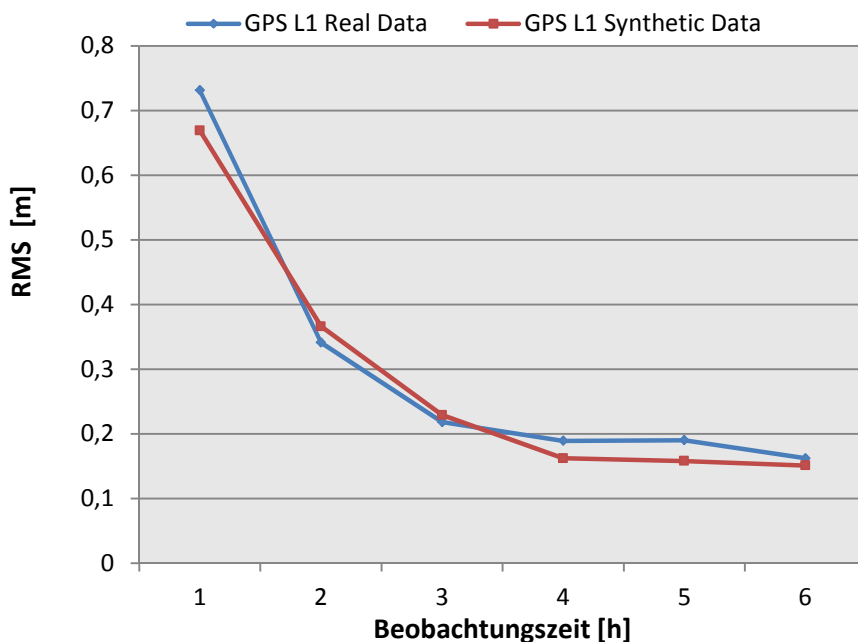


Abbildung 6-2: Vergleich von simulierten und realen GPS L1-Daten nach der Anpassung des stochastischen Modells

6.2.2 Analyse der Galileo E5 und GPS L1-CPC-Ergebnisse

Im vorherigen Abschnitt wurde das stochastische Modell verfeinert, damit die Ergebnisse der simulierten Daten die Realität bestmöglich repräsentieren. Nun lassen

sich Einfrequenz-Positionierungsergebnisse, die durch die Kombination von CPC-Messungen von Galileo E5 und GPS L1-Daten gewonnen werden, direkt vergleichen. Die Prozessierungssoftware „eXpert“ erlaubt es, verschiedene Einflussfaktoren (Antennenfehler, Erdgezeiten, ozeanische Auflasten etc.) weitgehend zu beseitigen. Die Mehrdeutigkeitsterme werden mit „Float“-Lösungen geschätzt.

Um die Problematik der Konvergenzzeit der Genauigkeit darzustellen, werden verschiedene Datensätze (Beobachtungszeiten von ¼ h, ½ h, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h, 6 h, 12 h, 18 h und 24 h) prozessiert. Die Prozessierung der ¼ h-Datensätze ergibt für Galileo E5 ein 3D RMS von ca. 8 dm und für GPS L1 eines von ca. 1,4 m. Bei der kurzen Beobachtungszeit sind das Messrauschen und der Multipath-Einfluss verhältnismäßig hoch, außerdem verschlechtert die Präsenz von Mehrdeutigkeits-termen die Positionsergebnisse. Wird die Beobachtungszeit der Daten auf ½ h erhöht, kann eine sprunghafte Verbesserung der Galileo E5 CPC-Ergebnisse (ca. 4 dm) beobachtet werden. Die Abbildung 6-3 zeigt einen Vergleich der verschiedenen Datensatz-Ergebnisse aus GPS L1 und Galileo E5:

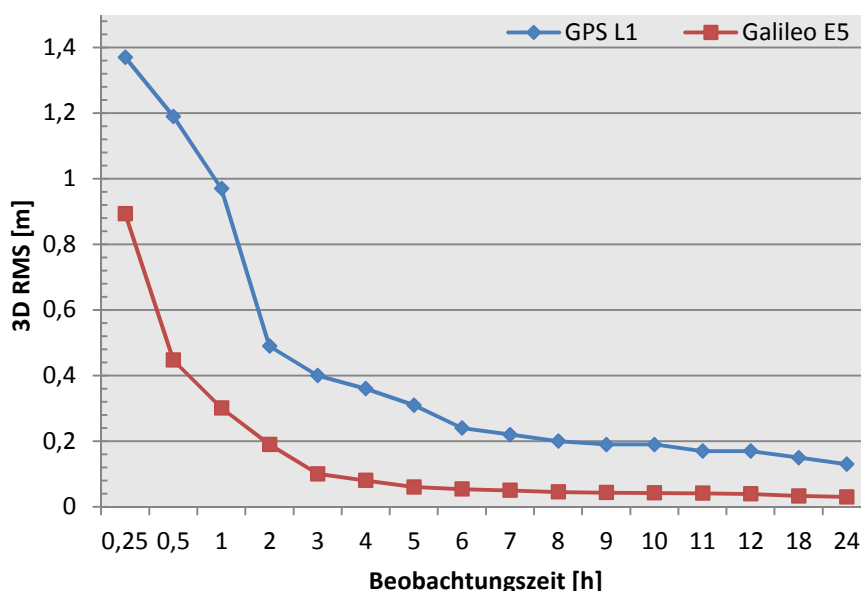


Abbildung 6-3: Vergleich der CPC-Ergebnisse aus verschiedenen langen GPS L1- und Galileo E5-Datensätzen

Es wird ersichtlich, dass die Galileo E5 CPC-Ergebnisse deutlich besser sind als diejenigen der GPS-L1 Messungen und dass sie schneller konvergieren. Ein genauerer Blick auf die Abbildung 6-3 zeigt nach einer Beobachtungszeit von 1 h eine Genauigkeit von nur wenigen Dezimetern für die Galileo-E5 CPC-Ergebnisse. Der Unterschied zu GPS L1 CPC-Ergebnissen ist auch hier bemerkbar: Letztere erreichen nur Submeter-Genauigkeiten. Nach einer Beobachtungszeit von 3 h erreichen die Galileo E5-CPC-Ergebnisse eine gewisse Genauigkeitsschwelle (im Zentimeter-Bereich), die als präzise bezeichnet werden kann. Ab diesem Zeitpunkt konvergieren die Genauigkeiten nur noch geringfügig und betragen nach 5 h Beobachtungszeit lediglich noch wenige Zentimeter. Mit Langzeitdatensätzen (> 5 h) werden Genauigkeiten im Bereich von 2-4 cm (3D RMS) erzielt. Dagegen erreicht man mit GPS L1-Datensätzen nach einer Beobachtungszeit von 24 h nur Genauigkeiten von 13-20 cm.

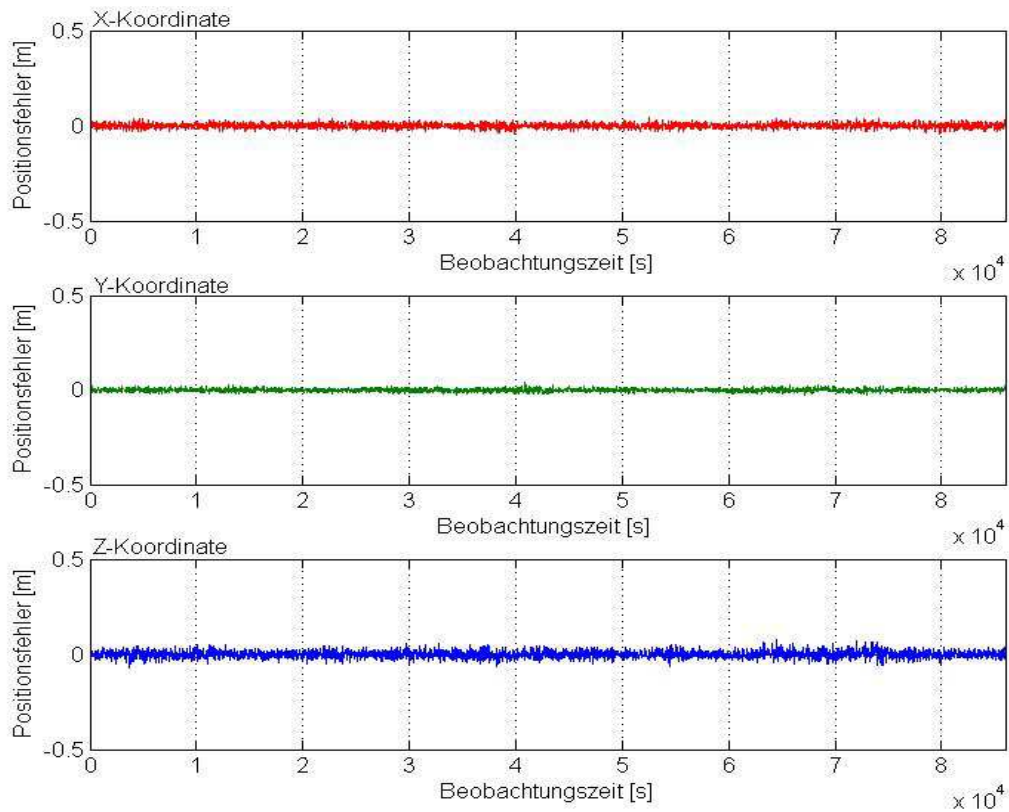


Abbildung 6-4: Galileo E5-CPC-Positionsfehler

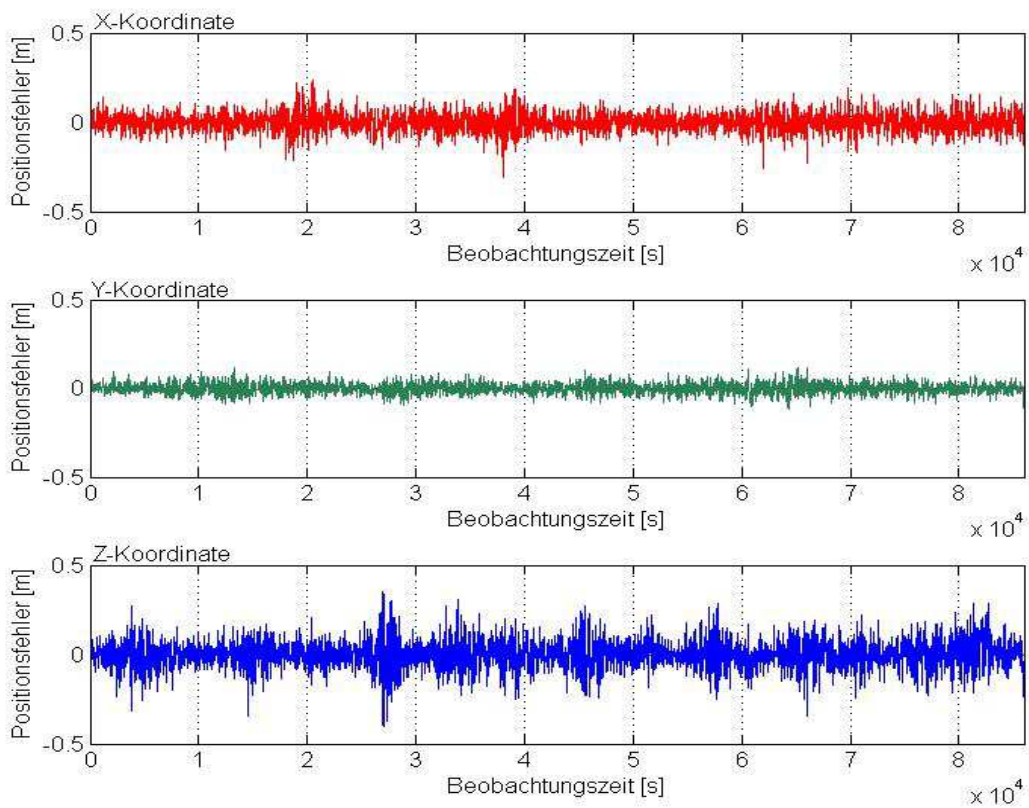


Abbildung 6-5: GPS L1-CPC-Positionsfehler

Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5 zeigen die Positionsfehler der einzelnen Koordinatenkomponenten für eine Zeitreihe von 24 h. Aus diesen beiden

Abbildungen kann man entnehmen, dass die Amplitude der Positionsfehler bei Galileo E5-CPC viel geringer ist als bei GPS L1-CPC. Bei den Galileo E5-CPC-Ergebnissen hat die horizontale Komponente eine Standardabweichung von ca. 2 cm und die vertikale Komponente eine von ca. 3 cm.

Bei den GPS L1-CPC-Ergebnissen ergeben die Standardabweichungen ca. 10 cm in der horizontalen Lage und 18 cm in der vertikalen Lage. Allgemein ist anzumerken, dass die horizontale Komponente genauer ist als die vertikale Komponente. Diese Tatsache erklärt sich dadurch, dass der Multipath-Fehler und die restlichen atmosphärischen Fehler mehr Einfluss auf die Höhenkomponente haben.

Das SGSS-Softwarepaket bietet eine Applikation „DEAN“ zur statistischen Analyse und zum Vergleich von Punktstreuungen. „DEAN“ analysiert die einzelnen Messungen aus einem Satz und stellt das Streuungsmaß dar. Diese Applikation wird genutzt, um das Streuungsverhalten der CPC-Ergebnisse mit Galileo E5- und GPS L1-Datensätzen zu vergleichen (siehe Abbildung 6-6).

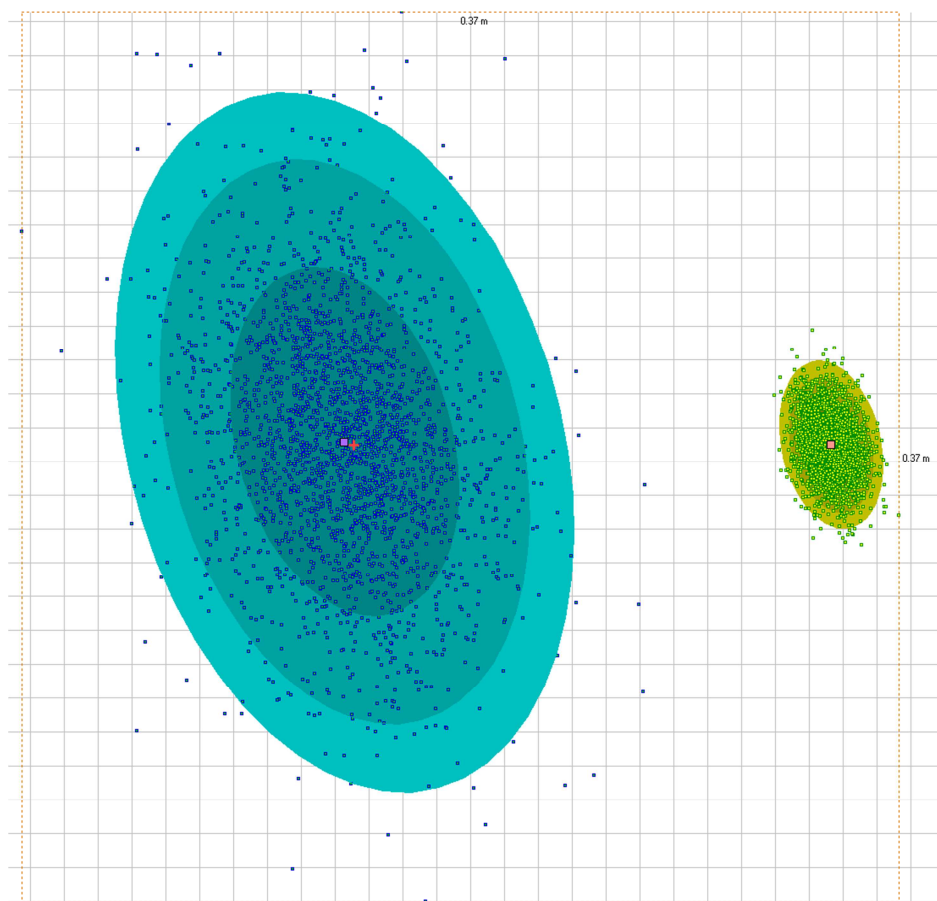


Abbildung 6-6: Punktstreuung der Galileo E5 und GPS L1-CPC-Ergebnisse (blaue Punkte: GPS L1 und grüne Punkte: Galileo E5)

Abbildung 6-6 zeigt, dass die einzelnen Punktmessungen des E5-Datensatzes (grüne Punkte) viel weniger gestreut sind als die des GPS L1-Datensatzes (blaue Punkte). Die Fehlerellipse der Galileo E5-CPC-Positionsergebnisse beträgt 5,2 cm, diejenige der GPS L1-CPC-Positionsergebnisse bis zu 44 cm. Das Streuungsmaß der Punkte ist mit der Messgenauigkeit korreliert und die Höhe der Streuung der Punkte zeigt

hauptsächlich den Pegel der Beeinträchtigung des Signals durch Mehrwegeausbreitung.

Schließlich werden die CPC-Positionsergebnisse der drei Netze (BRUS: mittlere Breite, OSLS: in Polnähe und OUAG: äquaturnah) aus den Test-Szenarien verglichen (siehe Tabelle 6-2). Damit soll gezeigt werden, wie sich die Positionierungsgenauigkeit in den verschiedenen Regionen der Erde verhält. Die CPC-Ergebnisse aus mittleren Breiten sind erwartungsgemäß geringfügig besser als diejenigen aus anderen Regionen. In Polnähe sind die CPC-Positionsgenauigkeiten aufgrund der schlechteren Satellitenkonstellation dort nicht ganz so gut. In Äquaturnähe leidet die Genauigkeit unter wesentlich größeren atmosphärischen Restfehlern, wodurch sie schlechter ausfällt.

Region	GPS 3D RMS [m]	Galileo 3D RMS [m]
Central Europe (BRUS)	0,105	0,022
Northern Europe (OSLS)	0,153	0,031
Africa (OUAG)	0,187	0,033

Tabelle 6-2: 3D RMS der CPC-Positionierungsergebnisse für drei verschiedene Regionen

In diesem Abschnitt wurden die erreichten CPC-Positionsgenauigkeiten von Galileo E5 und GPS L1 gegenübergestellt. Die statistischen Analysen konnten eine deutliche Verbesserung der CPC-Positionsgenauigkeit mit Galileo E5-Daten gegenüber GPS L1-Daten verzeichnen. Insofern wird die CPC-Methode mit Galileo E5-Daten die Anforderungen für viele präzise Positionierungsanwendungen erfüllen.

6.2.3 Analyse der Galileo E5 und GPS L5-CPC-Ergebnisse

Im Zuge der Modernisierung von GPS wurde ein neues ziviles Signal, das als „L5“ bezeichnet wird, implementiert. L5 soll durch ein im Vergleich zum bestehenden zivilen GPS-Signal verbessertes Signal-Design, eine höhere Signalstärke sowie eine fortschrittliche Codestruktur die Genauigkeit und Robustheit der GPS-Navigationslösung erhöhen (siehe ERKER et al. [2011]). Das Signal L5 hat die gleiche Frequenz (1176,45 MHz mit einer Bandbreite von 24 MHz) wie das E5a-Untersignal des Galileo-Breitband-Signals E5. Daher scheint L5 ähnliche Charakteristiken zumindest wie ein Teil des Galileo E5-Signals aufzuweisen. Das Codemessrauschen von L5 ist geringer als das von L1. Außerdem ist das GPS L5 im Vergleich zu L1 weniger beeinflussbar durch Multipath. Auf der Grundlage der zuvor beschriebenen Tests werden L5-Datensätze mit dem CPC-Ansatz prozessiert und ihre Positionsgenauigkeiten analysiert. Hier werden ebenfalls nur die sog. „Float“-Lösungen der Mehrdeutigkeitsterme mitgeschätzt.

Der Positionsfehler der GPS L5-CPC-Ergebnisse zeigt ein ähnliches Konvergenzverhalten wie bei den vorhin berechneten Ergebnissen (vgl. Abschnitt 6.2.2). Mit einem 0,5 h-Datensatz wird eine Genauigkeit von ca. 6 dm erzielt. Mit steigender Beobachtungszeit verbessern sich die Genauigkeiten; bei ungefähr 5 h Beobachtungszeit wird eine Genauigkeit von ca. 6 cm erzielt.

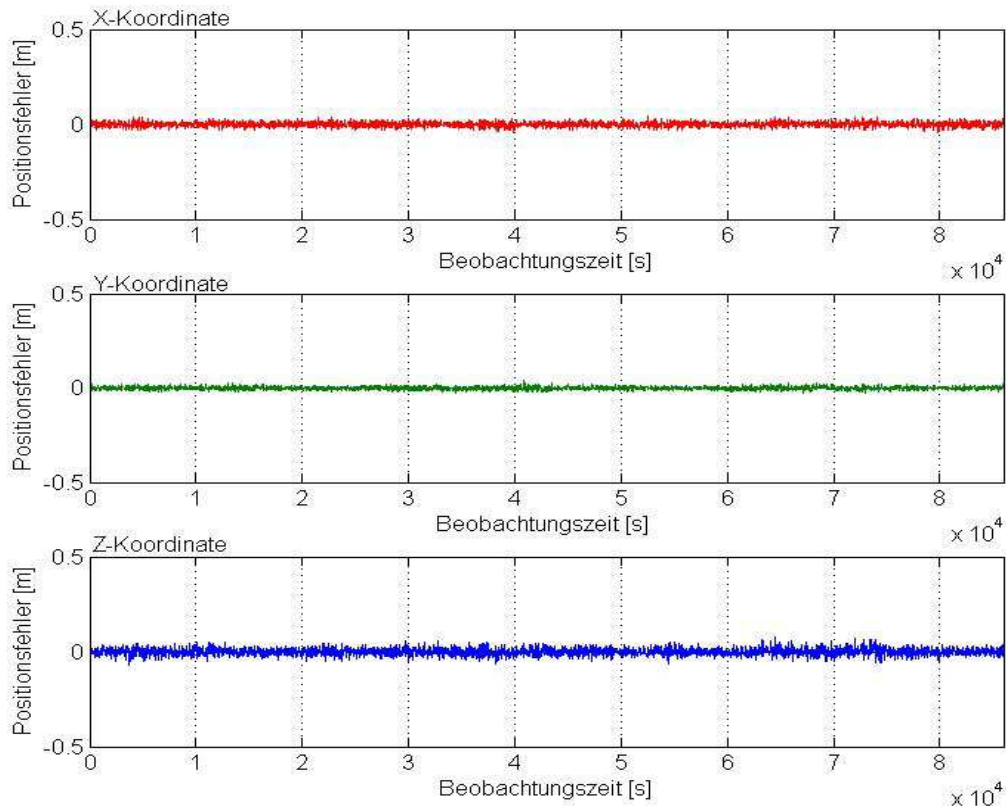


Abbildung 6-7: Galileo E5-CPC-Positionsfehler

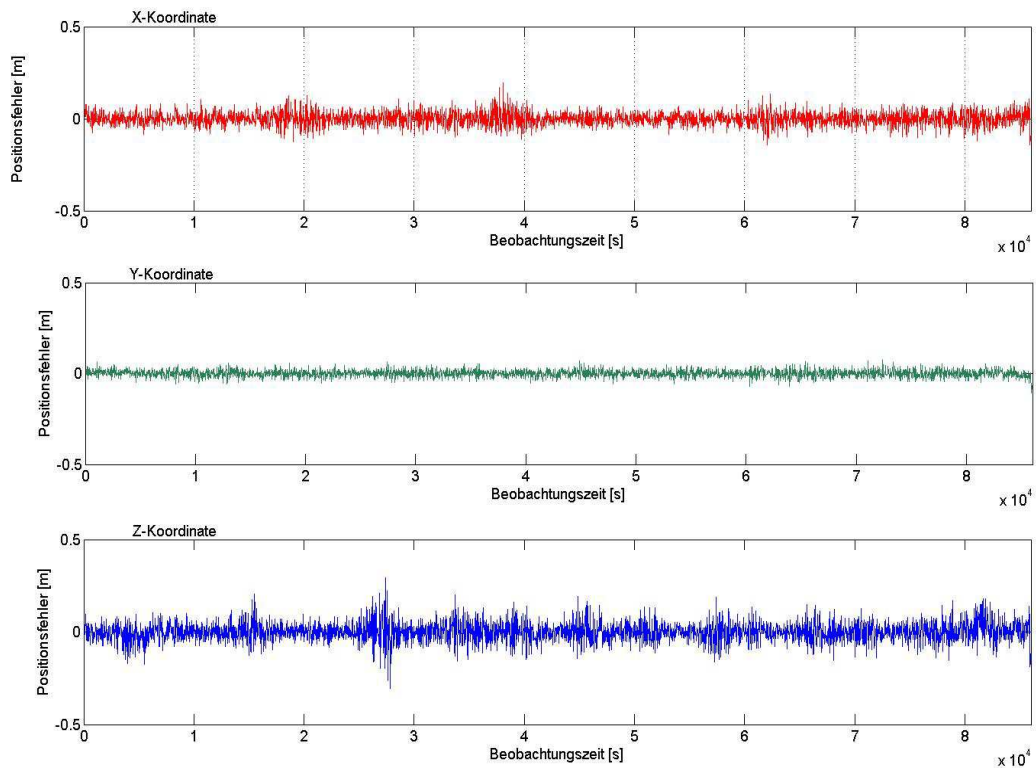


Abbildung 6-8: L5-CPC-Positionsfehler

Diese ändert sich mit längeren Datensätzen nur wenig. Es ist damit offensichtlich, dass die Galileo E5-CPC-Positionierungsergebnisse auch in diesem Vergleich besser abschneiden. Zwar werden mit GPS L5-Datensätzen CPC-Positionsgenauigkeiten im Bereich von 5-7 cm erzielt, diese sind jedoch immer noch zweimal schlechter als diejenigen mit Galileo E5-Datensätzen (2-3 cm). Abbildung 6-7 und Abbildung 6-8 vergleichen eine 24-stündige Beobachtungszeitreihe von Galileo E5- und GPS L5-CPC-Positionsfehlern. Berechnungen der CPC-Positionen aus den drei Testregionen erlauben es, einen direkten Vergleich der GPS L1, GPS L5- und Galileo E5-Ergebnisse vorzunehmen.

Die Abbildung 6-9 zeigt die Genauigkeitsverbesserung der Ergebnisse mit GPS L5 gegenüber denjenigen mit GPS L1. Sie zeigt auch, dass GPS L5 robuster ist als GPS L1 in Bezug auf Codemessrauschen. Aufgrund ihrer besseren Eigenschaften (Breitband, weniger Mehrwegeanfälligkeit, geringeres Codemessrauschen) erzielen Galileo E5-Daten jedoch die besseren Positionierungsergebnisse mit der CPC-Methode.

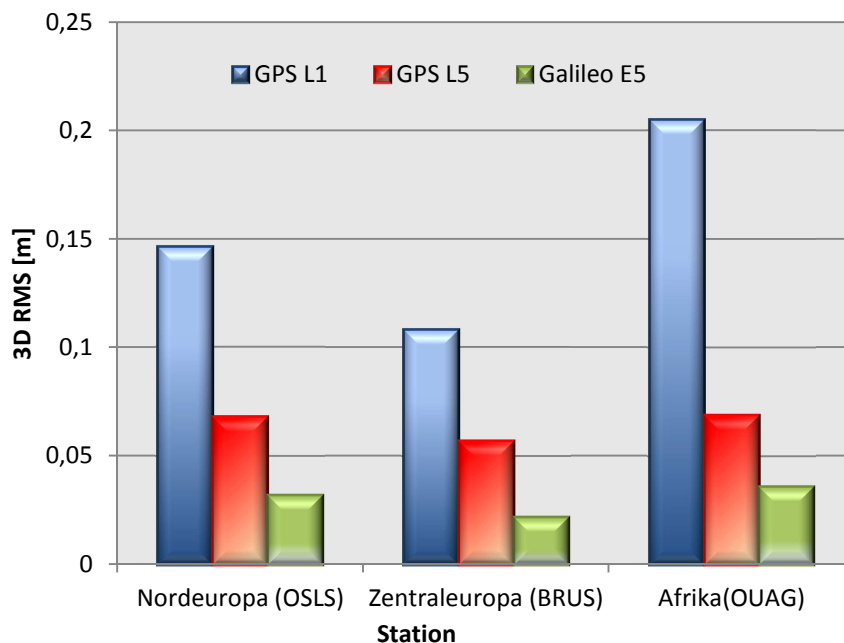


Abbildung 6-9: CPC-Ergebnisse (3D RMS) aus GPS L1, L5 und Galileo E5

Die mit simulierten Daten durchgeführten Experimente konnten die Leistungsfähigkeit der CPC-Methode unter Beweis stellen. Dabei werden die besseren Ergebnisse eindeutig mit Galileo E5-Datensätzen erzielt. Ein preisgünstigerer Galileo E5-Einfrequenz-Empfänger kann somit präzise Positionierungsergebnisse liefern und stellt eine gute Alternative zu den teuren Multifrequenz-empfängern in vielen GNSS-Applikationsbereichen dar.

6.2.4 Code-Plus-Carrier (CPC)-Methode vs. Trägerphasenprozessierung (Carrier Phase: CP)

Bei der Trägerphasenprozessierung werden die Koordinaten eines Punktes unter Verwendung der Phasenmessungen des vom Satelliten empfangenen Trägersignals relativ zu der vom Empfänger generierten Trägerphase zum Empfangszeitpunkt

berechnet. Der Einfluss von Multipath und Phasenmessrauschen ist bei Trägerphasenmessungen sehr gering. Neben der Messung der Phase muss hier aber auch noch die Anzahl der Wellen zwischen dem Satelliten und dem Empfänger bestimmt werden (Auflösung der Trägerphasenmehrdeutigkeit). Sind die Mehrdeutigkeiten einmal korrekt aufgelöst worden und werden die atmosphärischen Laufzeitverzögerungen in geeigneter Weise (lineare Kombination mehrerer Frequenzen) mitigiert, kann der Empfänger Positionen auf wenige cm bis mm genau berechnen. Aufgrund dieser hohen Genauigkeit verlassen sich die präzisen GNSS-Anwender ausschließlich auf hochwertige geodätische Empfänger, die Trägerphasenmessungen von mindestens zwei Frequenzen zur Positionsberechnung nutzen.

In diesem Abschnitt werden Trägerphasenmessungen prozessiert und deren Genauigkeit derjenigen der Galileo E5-CPC-Prozessierung gegenübergestellt. Eine geeignete Methode, um den ionosphärischen Fehler bei der Trägerphasenprozessierung zu eliminieren, ist die ionosphärenfreie lineare Kombination von mindestens zwei Frequenzen. Diese Kombination wird hier im relativen Positionierungsmodus (dadurch werden andere korrelierende Fehler eliminiert) eingesetzt, um die Koordinaten der Stationen aus den Testszenarien zu berechnen. Dabei werden folgende Frequenzkombinationen gebildet:

- GPS L1 + L2
- GPS L1 + L5
- Galileo E1 + E5
- GPS L1 + L2 + Galileo E1 + E5

Es werden vier verschiedene Datensätze (1 h, 3 h, 6 h und 24 h) prozessiert:

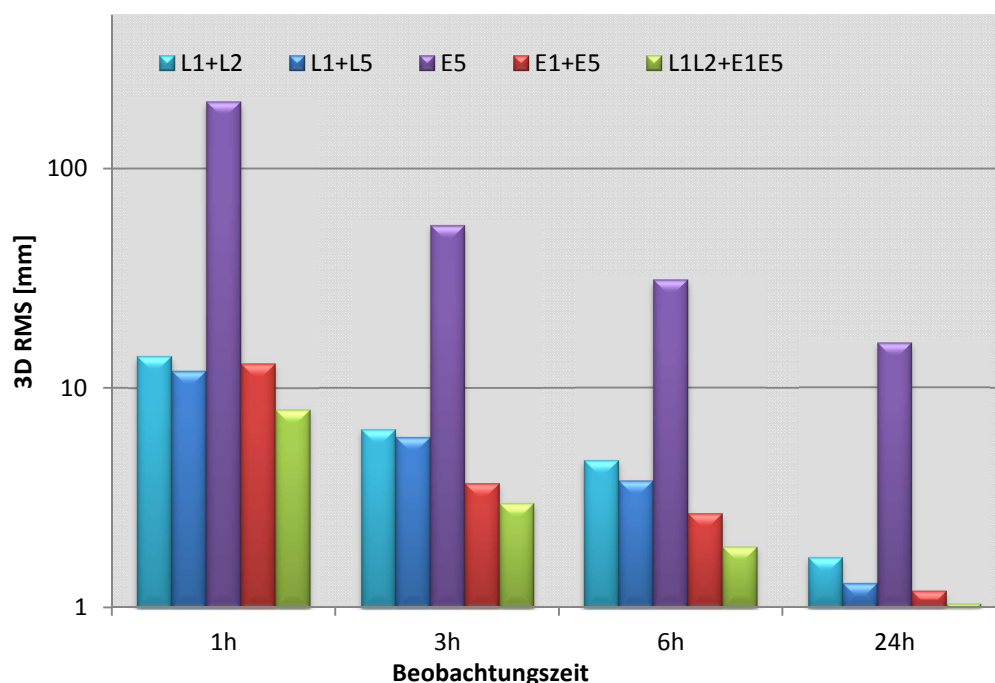


Abbildung 6-10: Vergleich der Positionsgenauigkeiten von Trägerphasenprozessierung und Galileo E5-Einfrequenzprozessierung (CPC)

Abbildung 6-10 zeigt die Positionierungsergebnisse der Trägerphasenprozessierung im Vergleich zur Galileo E5-Einfrequenz-Prozessierung (CPC).

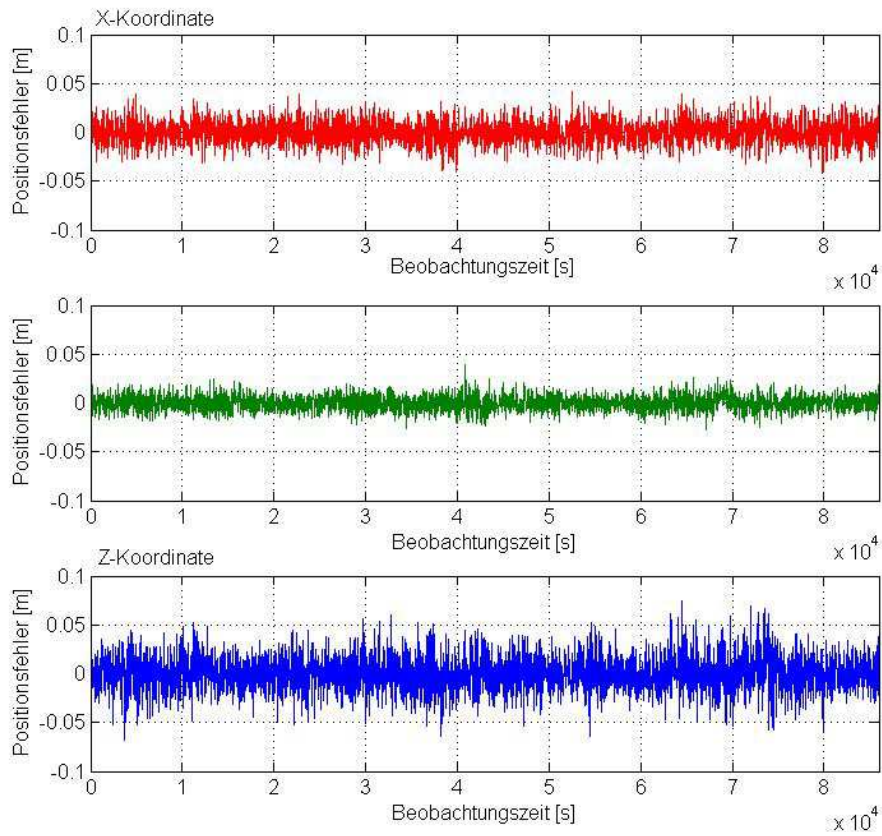


Abbildung 6-11: Galileo E5-CPC-Positionsfehler

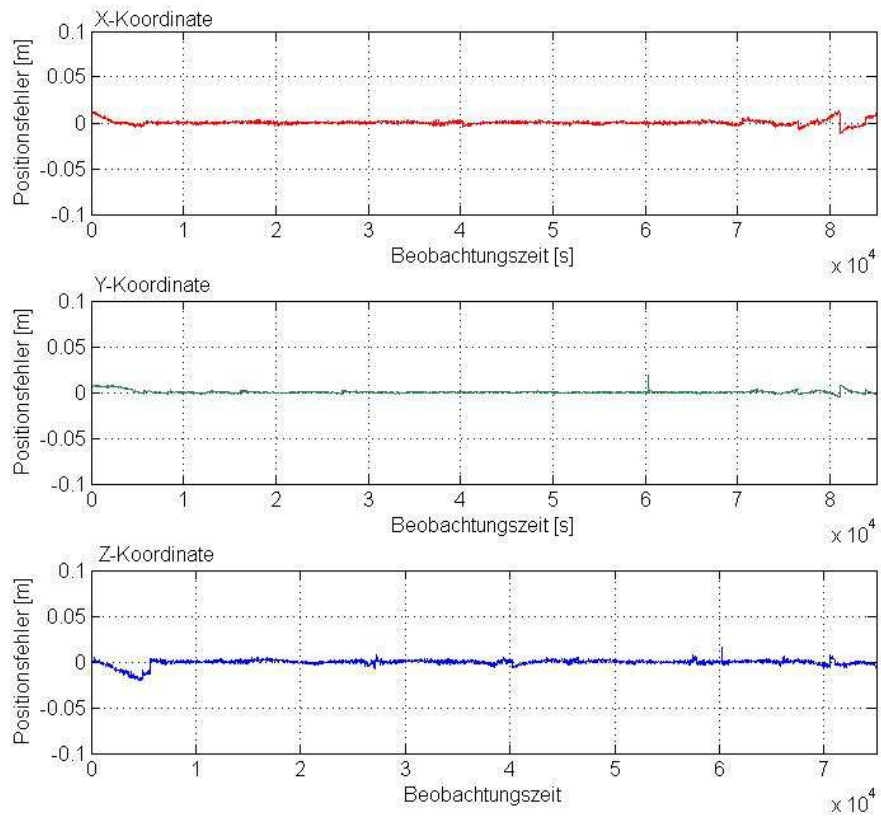


Abbildung 6-12: GPS L1+L5 Trägerphasen-Positionsfehler

Auf den ersten Blick fällt auf, dass die Trägerphasen-Positionierungsergebnisse eindeutig genauer sind als die Galileo E5-CPC-Ergebnisse. Die Trägerphasen-Positionsgenauigkeit (1-2 mm für 24 h-Datensätze) ist fast um den zehnfachen Faktor besser als die Galileo E5-CPC-Genauigkeit. Die Erklärung dafür ist, dass sich die beiden Methoden grundlegend unterscheiden. Die CPC-Methode kombiniert Codestrecken- mit Trägerphasenmessungen. Die schlechteren Codestreckenmessungen (höheres Messrauschen und Multipath-Einfluss) machen sich dann in den CPC-Kombinationen bemerkbar, indem sie die Genauigkeit reduzieren.

Die durch die CPC-Kombination entstehenden Mehrdeutigkeitsterme können nur schwer mit Einfrequenz-Daten geschätzt werden. Bei der Trägerphasenprozessierung werden mehrere Frequenzen kombiniert, die eine direkte Auflösung der Mehrdeutigkeit erlauben. Abbildung 6-11 (Galileo E5-CPC) und Abbildung 6-12 (GPS L1+L5 Trägerphasenprozessierung) vergleichen die Positionsfehler der einzelnen Koordinatenkomponenten aus einer 24 h-Beobachtungszeitreihe und bestätigen damit die höhere Wertigkeit der Trägerphasen-Positionierungsergebnisse.

Mit der Trägerphasenprozessierung werden Positionskordinaten im Bereich von wenigen Millimetern berechnet. In der Folge sind die hierfür eingesetzten Technologien (NCO: „Numerically Controlled Oscillator“, Filter, Diskriminator etc.) bzw. die Algorithmen (PLL) aufwändig und anspruchsvoll, woraus die hohen Preise für derartige Empfänger resultieren. Es wird angenommen, dass ein Galileo E5 Einfrequenz-Empfänger um einiges preisgünstiger ausfallen wird als Mehrfrequenz-Empfänger. Obwohl die Genauigkeit der Galileo E5-CPC-Positionierungsergebnisse sich nicht mit derjenigen der Mehrfrequenz-Trägerphasenergebnissen messen kann, kann sie die Anforderungen vieler präziser Positionierungsanwendungen im Bereich von wenigen Zentimetern bis Dezimetern erfüllen.

6.2.5 Mehrwegeeffekte

Einer der wichtigsten Gründe für die Verwendung von Galileo E5 bei der CPC-Einfrequenz-Methode ist die Tatsache, dass insbesondere die E5-Codestreckenmessungen im Vergleich zu anderen GNSS-Signalen weniger von Multipath-Effekten beeinflusst werden. Aufgrund seiner Bandbreite (bis zu 90 MHz) und der AltBOC-Modulation weist Galileo E5 die niedrigsten Multipath-Effekte auf, die bis dato gemessen wurden (siehe Abbildung 2-3). Multipath ist ein ortsspezifisches Phänomen, da die Messstationen und die Satelliten unter dem Einfluss einer jeweils einzigartigen Umgebung stehen. Außerdem ist das Multipath ein dynamischer Fehler, der sich mit der Bewegung des Satelliten und den reflektierenden Flächen (wie z.B. durch unterschiedliche Vegetation, trockener oder feuchter Boden) verändert. Daher wird untersucht, wie sich die CPC-Methode in verschiedenen Multipath-Umgebungen verhält. Dafür werden synthetische GNSS-Daten (L1/E1, E6, E5) für ein offenes Gelände (weniger durch Multipath beeinflusst), für eine Vorstadt-Gegend (mittelmäßig durch Multipath beeinflusst) und ein bebautes bzw. bewaldetes Gebiet (stark durch Multipath beeinflusst) erzeugt. Die generierten Datenpakete decken einen Beobachtungszeitraum von 3 h ab und haben eine zeitliche Auflösung von 5 s, damit die Positionsgenauigkeit genügend konvergieren kann. Dieses Experiment konzentriert sich hauptsächlich auf die Multipath-Analyse. Daher wird die Simulation so durchgeführt, dass andere Fehlerquellen nur geringfügige Auswirkungen auf die synthetischen Daten haben.

Für die Prozessierung der Daten wird eine Elevationsmaske von 10° eingestellt, da Satelliten mit einer niedrigeren Elevation erheblich stärker durch Multipath beeinträchtigt werden als Satelliten mit einer höheren Elevation. Mit einem Skalierungsmodell wird die Verteilung der Multipath-Effekte in der Simulation angepasst, so dass die Satelliten mit der größten Elevation (90°) immer die niedrigsten Mehrwege-Auswirkungen aufweisen. Für die im offenen Gelände simulierten Beobachtungsdaten (fast freie Sichtlinie zwischen der Antenne und dem Satelliten) wird ein Multipath-Einflussfaktor von 30% des maximalen Galileo E5-Fehlers (siehe Abbildung 2-3) auf die Messungen aus Satelliten mit der niedrigsten Elevation (10°) und ein Faktor von nur 1,5% auf diejenigen aus Satelliten mit der höchsten Elevation (90°) modelliert. In einer Vorstadt-Gegend ist mehr reflektierende Infrastruktur vorhanden, weswegen die Reflexion elektromagnetischer Signale hier etwas höher ausfällt als im offenen Gelände. Die Multipath-Einflussfaktoren für diese Umgebung werden wie folgt gewählt: Ein Skalierungsfaktor von 50% für Satelliten mit einer niedrigen Elevation und ein Faktor von 1,5% für Satelliten mit der höchsten Elevation. In bebauten Bereichen oder in Regionen mit dichter Vegetation ist die Reflexion von elektromagnetischen Wellen am höchsten. Dies führt dazu, dass GNSS-Messungen in diesen Gebieten sehr stark von Multipath beeinträchtigt sind. Für diese Messszenarien wird der Multipath-Template so skaliert, dass der Faktor 90% (Stadt) bzw. 80% (Wald) für die niedrigsten Satelliten (10° Elevation) beträgt. Für die Satelliten, die am Zenith sind, wird der Faktor auf 10% gesetzt.

Für die beschriebenen Multipath-Szenarien werden die Positionen mit der CPC-Methode berechnet. Abbildung 6-13 vergleicht die CPC-Positionsergebnisse von GPS L1, Galileo E6 und Galileo E5.

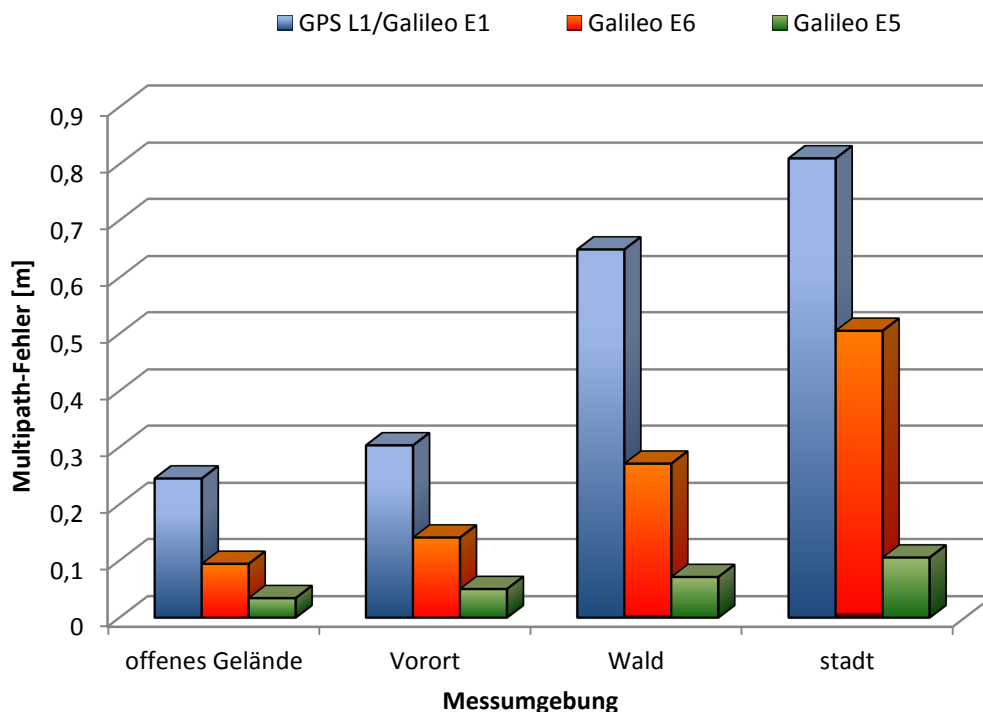


Abbildung 6-13: Vergleich der CPC-Positionierungsergebnisse aus verschiedenen Umgebungen

Aufgrund der Eigenschaften des Galileo E5-Signals zeigen die E5 CPC-Ergebnisse nur geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Messumgebungen (siehe Abbildung 6-14). Mit erhöhtem Multipath-Einfluss verschlechtern sich zwar die Positionsergebnisse, dies geschieht jedoch in viel geringerem Ausmaß als bei anderen GNSS-Signalen. Dieser Umstand wird bei einem Vergleich einerseits der Punktstreuungen der Galileo E5-CPC-Ergebnisse im offenen Gelände mit denjenigen (Abbildung 6-14) und andererseits der Punktstreuungen der Galileo E5-CPC-Ergebnisse mit denjenigen von GPS L1 im städtischen-Bereich (Abbildung 6-15) evident.

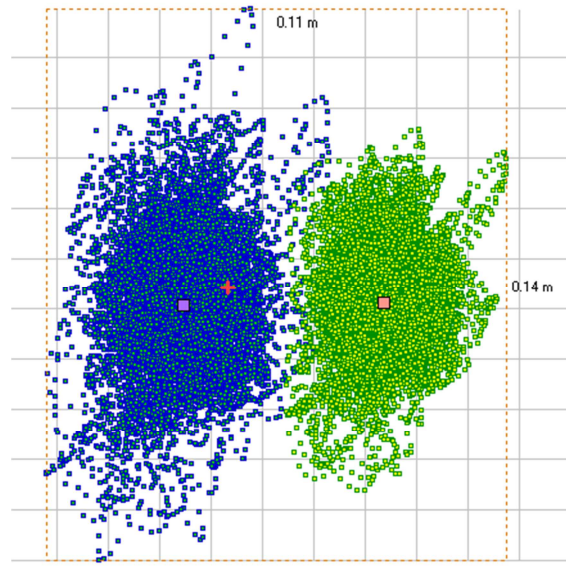


Abbildung 6-14: Vergleich der Punktstreuungen von Galileo E5-CPC-Positionierungsergebnisse im offenen Gelände (grüne Punkte) und denjenigen im städtischen Bereich (blaue Punkte)

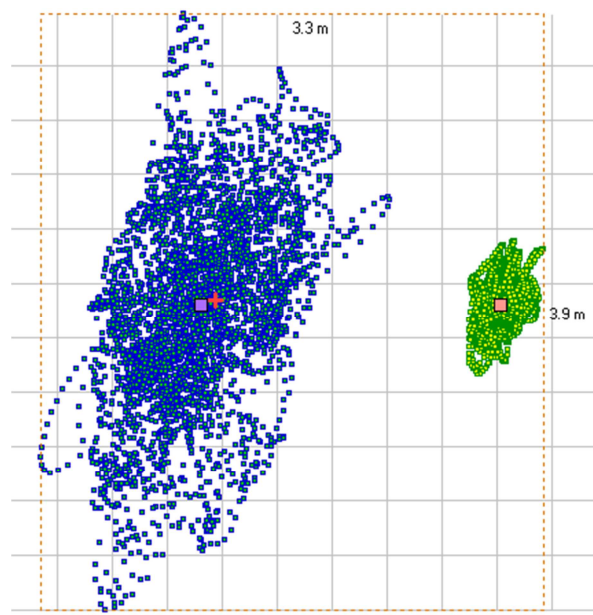


Abbildung 6-15: Vergleich der Punktstreuungen von Galileo E5-CPC-Positionierungsergebnissen im offenen Gelände (grüne Punkte) mit GPS L1-CPC-Positionierungsergebnissen im städtischen Bereich (blaue Punkte)

Im städtischen Bereich und im Wald erreichen die Galileo E5-CPC-Ergebnisse Genauigkeiten im Subdezimeter-Bereich. Folglich ist in diesen Fällen die Anwendung von Multipath-Mitigationsverfahren (siehe Abschnitt 3.2.4.2) angezeigt, um die Präzision der CPC-Methode (im Zentimeter-Bereich) mit Galileo E5 gewährleisten zu können.

6.2.6 Mehrdeutigkeitslösung mit Suchalgorithmen

Bei den bisherigen Berechnungen der CPC-Positionsergebnisse wurde der Mehrdeutigkeitsterm der CPC-Beobachtungsgröße (Gleichung 2-24) mit Hilfe der Kleinste-Quadrat-Ausgleichung auf Fließkommazahlen (Float-Werte) geschätzt, die Näherungswerte sind. Diese Schätzung ist nur eine Übergangslösung, da es einer gewissen Zeit bedarf, um mit ihr präzise Koordinaten zu berechnen: Bei den durchgeführten Tests wurde nämlich festgestellt, dass die CPC-Methode mit den Fließkommazahlen mindestens 1 h benötigt, um vernünftige Positionsergebnisse im Dezimeter-Bereich liefern zu können. Bei der Galileo E5-CPC-Prozessierung dauern die Beobachtungszeiten im Durchschnitt 3 h, bis die gewünschten Ergebnisse im Zentimeter-Bereich erreicht werden. Die Fixierung der unbekanntenen Mehrdeutigkeitsterme des doppelt differenzierten CPC-Positionsvektors ist nun der Schlüssel, um schneller genaue CPC-Positionierungsergebnisse (im Zentimeter-Bereich) zu erhalten. Deshalb ist es zwingend notwendig, die Mehrdeutigkeitsterme mit einer adäquaten Methode auf ihre ganzzahligen (Integer-) Werte zu fixieren.

Dafür gibt es eine Vielzahl von Algorithmen. Eine verbreitete Methode ist das in Abschnitt 2.7.2 beschriebene sog. LAMBDA („Least-squares AMBIGUITY Decorrelation Adjustment”)-Verfahren, das von TEUNISSEN [1995] definiert wurde. LAMBDA ist ein sehr effizienter und nicht rechenintensiver Ansatz. Die Positionsberechnung mit der Lösung der Mehrdeutigkeit nach der LAMBDA-Methode erfolgt in drei Schritten, DE JONGE and TIBERIUS, [1996]: Als Erstes wird die ganzzahlige Natur der Mehrdeutigkeiten verworfen und die sog. „Float“-Lösung durch eine Standard-Kleinste-Quadrat-Ausgleichung berechnet. Im zweiten Schritt wird die „Float“-Lösung angepasst, um die Ganzzahligkeit der Mehrdeutigkeiten zu berücksichtigen. Schließlich wird die „Float“-Lösung der restlichen Parameter (insbesondere die unbekannte Position und gegebenenfalls weitere Parameter wie atmosphärische Laufzeitverzögerungen) aufgrund ihrer Korrelation mit den Mehrdeutigkeiten korrigiert. Die Endlösung wird als „fixierte“ Lösung bezeichnet und dürfte im Fall der CPC-Methode rasche Positionsergebnisse im Zentimeter-Bereich erzielen als die Ergebnisse ohne Mehrdeutigkeitsfixierung.

Im „eXpert“-Tool sind verschiedene Funktionen zur Lösung der Mehrdeutigkeit vorhanden, u.a. die oben genannte LAMBDA-Methode, die für die Fixierung des Mehrdeutigkeitsterms von Einfrequenz-Messungen gut geeignet ist. Die Mehrdeutigkeitslösung bei Einfrequenz-Messungen ist nicht trivial. Beim CPC-Ansatz scheitert für GPS L1-Messungen die Fixierung der Mehrdeutigkeit an der Präsenz von höherem Codemessrauschen in der Beobachtungsgröße. Hingegen sind Galileo E5-Messungen in dieser Hinsicht robuster, was bei CPC-Positionsberechnungen zur Mehrdeutigkeitsfixierung verhilft.

Aufgrund der zu erwartenden hohen Standardabweichungen der Koordinaten innerhalb der ersten fünf Minuten der Beobachtungszeit kann der Einsatz von sog.

Koordinaten-„Constraints“, die aus der DGNSS-Phase der Prozessierung (siehe 2.5.1) abgeleitet werden, die Konvergenzzeit der Positionsergebnisse noch verkürzen. Die Verwendung von Koordinaten-„Constraints“ aus der DGNSS-Phase ist eine gute Alternative zum Einsatz sequentieller Filter für die Parameterschätzung, da es für Basislinien über 100 km wegen der unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen häufig sehr schwierig ist, eine schnelle Konvergenz der Koordinaten mit einem sequentiellen Filter zu erreichen. Die Abbildung 6-16 zeigt die Schritte zur Lösung der Mehrdeutigkeit mit der Einführung von Koordinaten-„Constraints“:

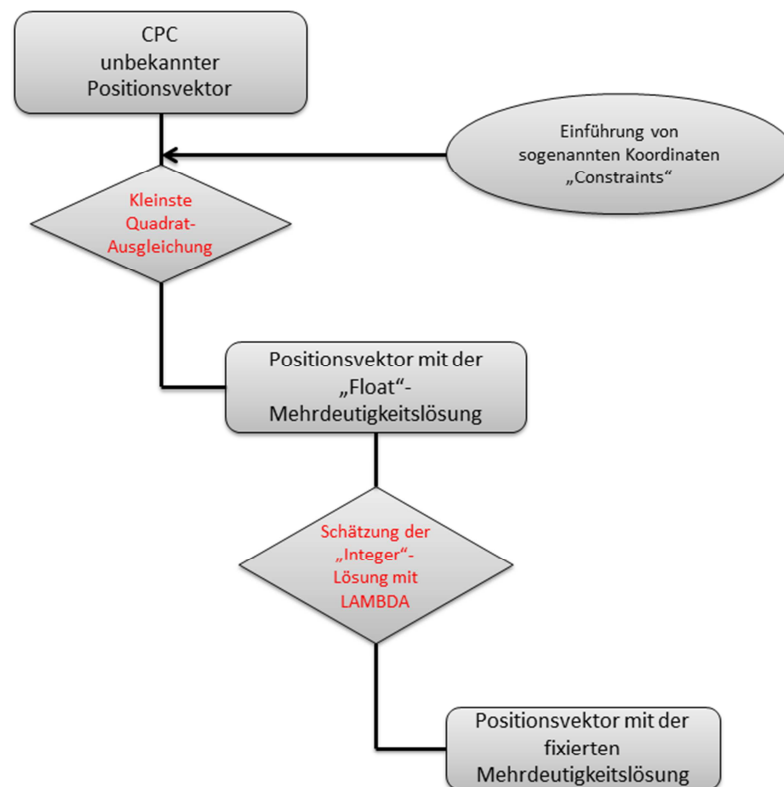


Abbildung 6-16: CPC-Prozessierungsschritte zur Lösung der Mehrdeutigkeit

Um die Wirkung der Mehrdeutigkeitslösung zu zeigen, werden zunächst Positionen ohne „Constraints“ und dann mit „Constraints“ berechnet. Abbildung 6-17 präsentiert die Ergebnisse der Prozessierung und führt den Beweis, dass es möglich ist, bei der Galileo E5-CPC-Prozessierung mit der LAMBDA-Methode die Mehrdeutigkeitsterme zu fixieren und innerhalb kurzer Zeit eine Positionsgenauigkeit im Bereich von wenigen Zentimetern zu erzielen. TEUNISSEN [1995] definiert die sog. Mehrdeutigkeitserfolgsrate als Häufigkeitsinterpretation der Wahrscheinlichkeit einer korrekten Mehrdeutigkeitsbestimmung. Bei der Prozessierung ohne „Constraints“ erreicht die Mehrdeutigkeitserfolgsrate erst nach ca. 20 min Werte nah an 1,0. Diese zeugen von einer erfolgreichen Mehrdeutigkeitsfixierung. Die Standardabweichung der Position ist für die ersten Messepochen sehr hoch (einige Meter). Durch die Einführung von Positionsergebnissen aus der DGNSS-Phase („Constraints“), die wesentlich kleinere Standardabweichungen (im Dezimeter-Bereich) aufweisen, erfolgt die Fixierung der Mehrdeutigkeit etwas früher (nach ca. 15 min). Damit erzielen die Galileo E5-CPC-Positionsergebnisse nach nur 15 min 3D-RMS im Bereich von

wenigen Zentimetern, was gegenüber der CPC-Positionsberechnung ohne Mehrdeutigkeitsfixierung (2-3 cm nach ca. 5 h) eine deutliche Verbesserung darstellt.

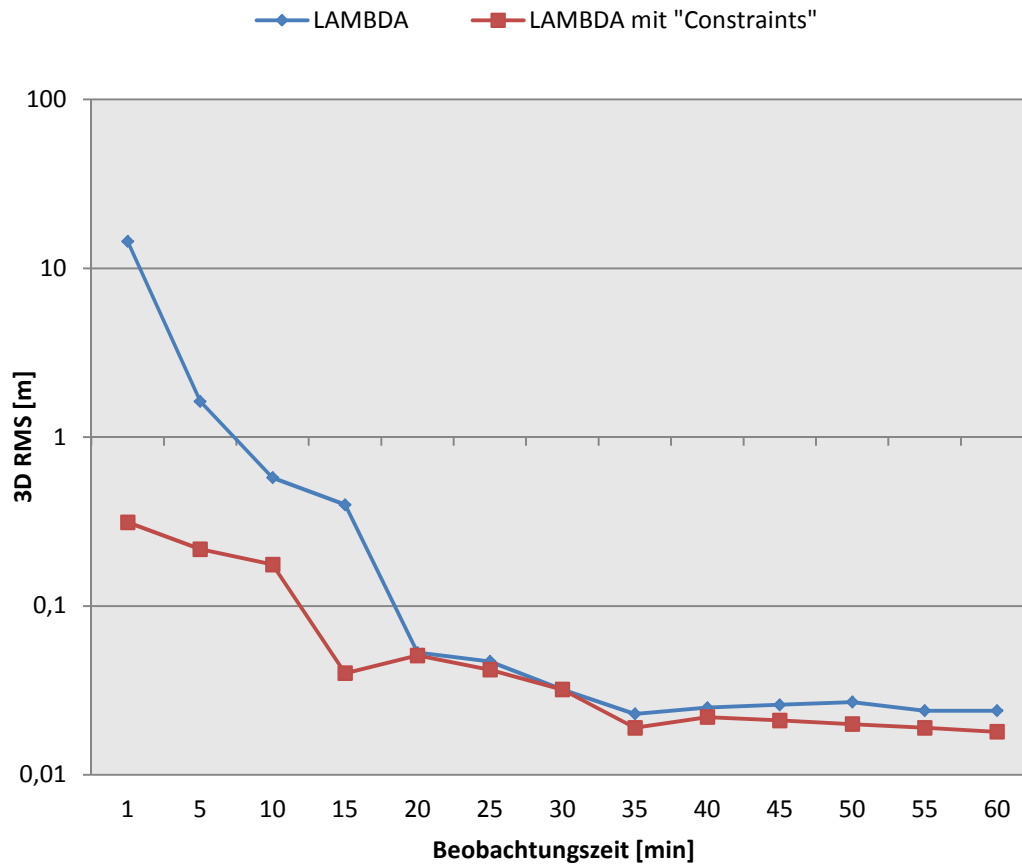


Abbildung 6-17: Galileo E5-CPC-Positionierungsergebnisse mit Mehrdeutigkeitsfixierung; die Abbildung ist im Sinne einer besseren Lesbarkeit logarithmisch skaliert

Die LAMBDA-Suchmethode ist also ein sehr effizientes Verfahren und in der Lage, die Mehrdeutigkeit der Galileo E5-kombinierten „Code-Plus-Carrier“-Messungen zu fixieren. Mit ihr werden relativ schnelle präzise Koordinaten erreicht. Die schnelle und erfolgreiche Mehrdeutigkeitsfixierung ist jedoch vom Multipath-Einfluss und den restlichen atmosphärischen Fehlern abhängig.

6.3 Basislinienabhängige Genauigkeitsanalyse

Ziel dieses Unterkapitels ist es, eine Analyse der E5-Einfrequenz-Positionierung über verschiedene Basislinienlängen (kurz, mittel und lang) durchzuführen, um erstens die Genauigkeit der Positionsbestimmung in Abhängigkeit von der Basislinienlänge zu beurteilen und zweitens die Auswirkung von saisonalen Variationen nachzuweisen. Da bei der Generierung der simulierten Daten verschiedene Fehlereinflüsse (z.B. Multipath) nur über eine kurze Zeit (ca. 24 h) modelliert werden können, wird erst eine Langzeitanalyse mit Realdaten genauere Auskunft über das Verhalten der CPC-Ergebnisse geben können.

6.3.1 Einfrequenz-Positionierung über kurze Basislinien

Die Untersuchung bezieht sich auf ein experimentelles Netz auf dem Gelände der Universität der Bundeswehr München. Bei kurzen Basislinien kann das Netz aus einer einzigen Basislinie bestehen. Hierfür wird die Station (4110) als Referenzstation verwendet, um die Position des Neupunkts (6202) zu bestimmen, Abbildung 6-18. Die Basislinienlänge beträgt ca. 650 m. Damit herrschen für die Referenzstation und die Rover-Station die gleichen atmosphärischen Bedingungen und der Orbitfehler-Einfluss ist für beide Stationen gleich. Diese Tatsache ist ein wichtiges Merkmal für die GNSS-Prozessierung über kurze Basislinien. Bei der Bildung der doppelten Differenzierung ist damit keine Korrektur des Troposphärenfehlers und des Orbitfehlers mehr notwendig, da diese sich wie viele andere korrelierende Fehler gegenseitig aufheben.

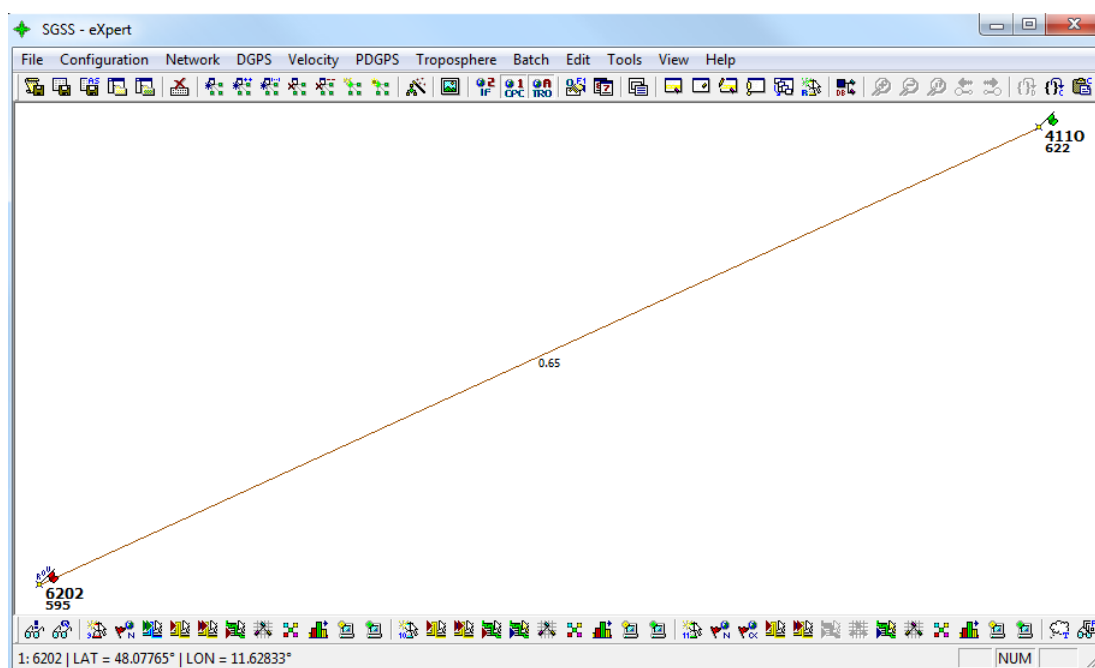


Abbildung 6-18: Kurze Basislinien-Prozessierungsanordnung

Hinsichtlich der Langzeitanalyse werden simulierte Daten über eine Messperiode von einem Jahr (GPS DoY: 001-365 des Jahres 2012) hinweg generiert. In der Simulation wird von einem weitgehend offenen Gelände ausgegangen. Somit kann man mit verhältnismäßig geringen Einflüssen von Mehrwegeeffekten rechnen.

Um die Auswirkungen der kurzen Basislinienlänge und das Verhalten der Positionslösung über einen langen Zeitraum zu analysieren, werden nun die Positionslösungen unter Anwendung der CPC-Kombination mit GPS L1-, GPS L5- und Galileo E5-Daten berechnet und die Ergebnisse miteinander verglichen. Zur Optimierung der Positionsergebnisse werden die Mehrdeutigkeiten anhand der LAMBDA-Methode gelöst. Durch die komplette Beseitigung der troposphärischen Laufzeitverzögerung kann eine Verbesserung der CPC-Positionslösung für alle Signale beobachtet werden. Die Genauigkeit der Galileo E5-Positionsergebnisse beträgt nun 1-2 cm. Die Mehrdeutigkeitslösung bei E5-Daten erfolgt nach einer Zeit von ca. 15 min vollständig. Die Mehrdeutigkeiten der GPS L5-Daten können

hingegen erst nach ca. 35 min fixiert werden. Für die GPS L1-Daten ist dies aufgrund des hohen Codemessrauschens dieses Signals nicht realisierbar.

Eine Analyse der Verteilung der CPC-Positionsfehler für ausgewählte Beobachtungsperioden zeigt deren Verhalten. Die Fehler sind bei Galileo E5-CPC-Positionsergebnissen weitgehend normalverteilt (vgl. Abbildung 6-19). Die Verteilungen der GPS-CPC-Positionsergebnisse sind dahingegen schief verteilt.

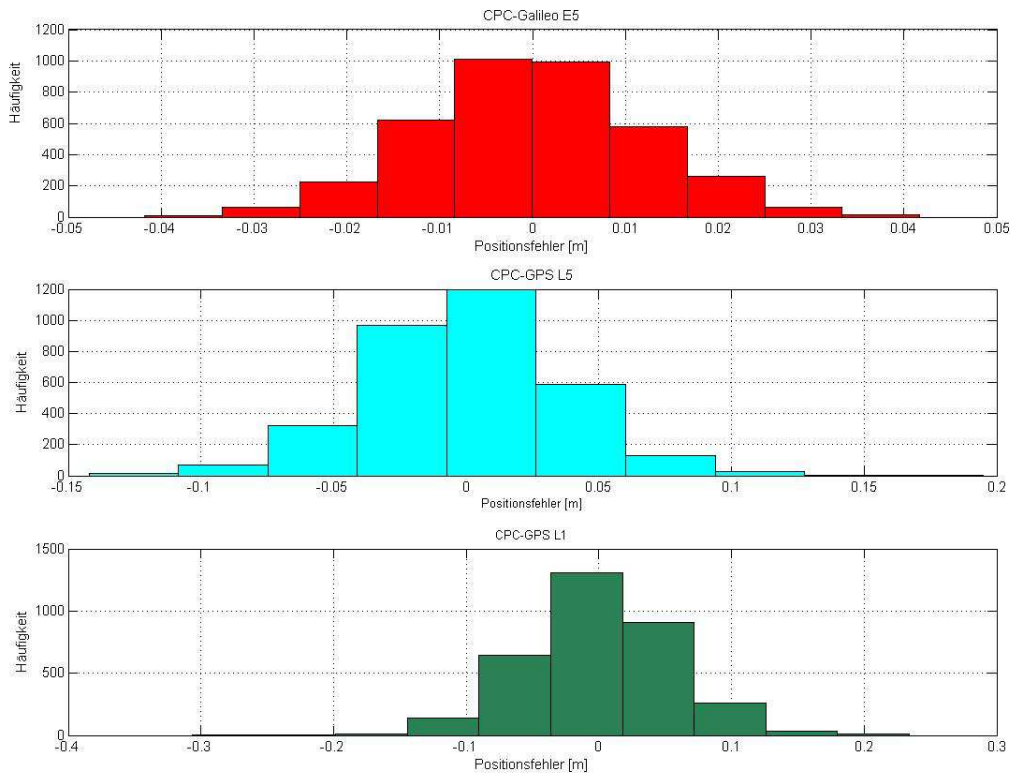


Abbildung 6-19: Verteilung der CPC-Positionsfehler

DoY	Minimaler Positionsfehler [cm]			Maximaler Positionsfehler [cm]			Mittelwert des Positionsfehlers [cm]			Standardabweichung [cm]		
	GPS L1	GPS L5	Gal E5	GPS L1	GPS L5	Gal E5	GPS L1	GPS L5	Gal E5	GPS L1	GPS L5	Gal E5
201	8,9	3,4	1,2	23,4	5,7	2,5	10,8	3,9	1,3	9,7	3,9	1,3
2	9,1	3,3	1,0	22,3	6,1	2,3	11,5	3,7	1,3	10,0	3,3	1,2
001	10,3	4,2	1,7	25,6	6,9	3,1	15,8	4,7	2,1	10,9	3,9	1,6
060	10,1	3,9	1,4	24,3	6,3	2,8	13,1	4,1	1,8	10,5	3,7	1,4
120	9,9	3,8	1,4	23,5	5,9	2,7	12,7	3,8	1,7	10,2	3,5	1,3
180	9,4	3,7	1,2	22,7	5,5	2,2	11,1	3,6	1,5	10,0	3,5	1,2
240	9,1	3,3	1,1	22,0	5,5	1,9	10,6	3,5	1,5	9,9	3,1	1,1
300												
360												

Tabelle 6-3: Darstellung der statistischen Kerngrößen der Genauigkeitsanalyse für eine kurze Basislinie

Die Tabelle 6-3 fasst die wichtigsten statistischen Kenngrößen der CPC-Einfrequenz-Positionierung zusammen.

Ein wichtiger Faktor bei Langzeit-Beobachtungsanalysen sind die saisonalen Variationen. Hierbei handelt es sich um periodische Systematiken im Jahresrhythmus. Als Ursachen werden nach POUTANEN et al. [2005] die atmosphärischen Druckänderungen, die Schneebedeckung, die Bodenfeuchte und Variationen in den ozeanischen Wassermassen genannt. Bei der aktuellen Messanordnung sind diese Variationen bei den statistischen Analysen nur in geringem Ausmaß ersichtlich. Ursächlich hierfür ist, dass über kurze Basislinien die meisten redundanten Einflussfaktoren (Gezeiten und ozeanische Auflasten) eliminiert werden. Die nächste Tabelle gibt die Amplituden der Variationen der Punkte mit der CPC-Methode wieder:

	Saisonale Variation [mm]		
	GPS L1	GPS L5	Galileo E5
Amplitude in Nordrichtung	5,1	3,2	2,7
Amplitude in Ostrichtung	5,5	3,4	2,5
Amplitude in der Höhe	7,1	3,7	3,1

Tabelle 6-4: Saisonale Variationen der Koordinaten-Komponenten über kurze Basislinien

Abschließend kann festgehalten werden, dass die CPC-Einfrequenz-Positionierung sehr präzise Positionsergebnisse über kurze Basislinien liefert. Die Bildung kurzer Basislinien setzt jedoch die Verfügbarkeit einer dichten Netzinfrastruktur voraus, die im Aufbau sehr kostspielig und nicht überall vorhanden ist.

6.3.2 Einfrequenz-Positionierung über mittellange Basislinien

Für die Stationen BRUS (Brussel), HELG (Helgoland), KLOP (Kloppenheim) sowie AUTN (Autun) werden Daten (GPS L1 und L5 sowie Galileo E5) ebenfalls über eine Zeitspanne von einem Jahr hinweg - vom 01.01.2012 bis 31.12.2012 - mit einer Auflösung von 30 s simuliert.

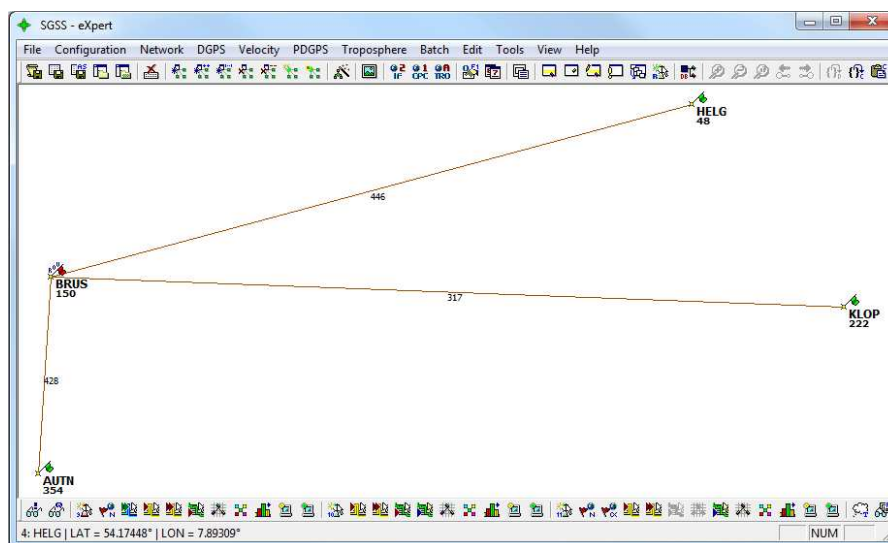


Abbildung 6-20: Mittellange Basislinien-Prozessierungsanordnung

Die Basislinien zwischen den Stationen sind ca. 300 bis 400 km lang. Damit bilden die Stationen ein aus mittellangen Basislinien bestehendes Netz (siehe Abbildung 6-20).

Ab einer Entfernung von 10 km zwischen den Stationen ändern sich die atmosphärischen Bedingungen zunehmend. Daher wirken auf die Stationen des Netzes völlig unterschiedliche atmosphärische Effekte, und viele andere Fehlerauswirkungen (z.B. Orbitfehler) sind nicht mehr redundant. Daher müssen bei der CPC-Prozessierung geeignete Korrekturen vorgenommen werden, um diese Fehler bestmöglich zu mitigieren.

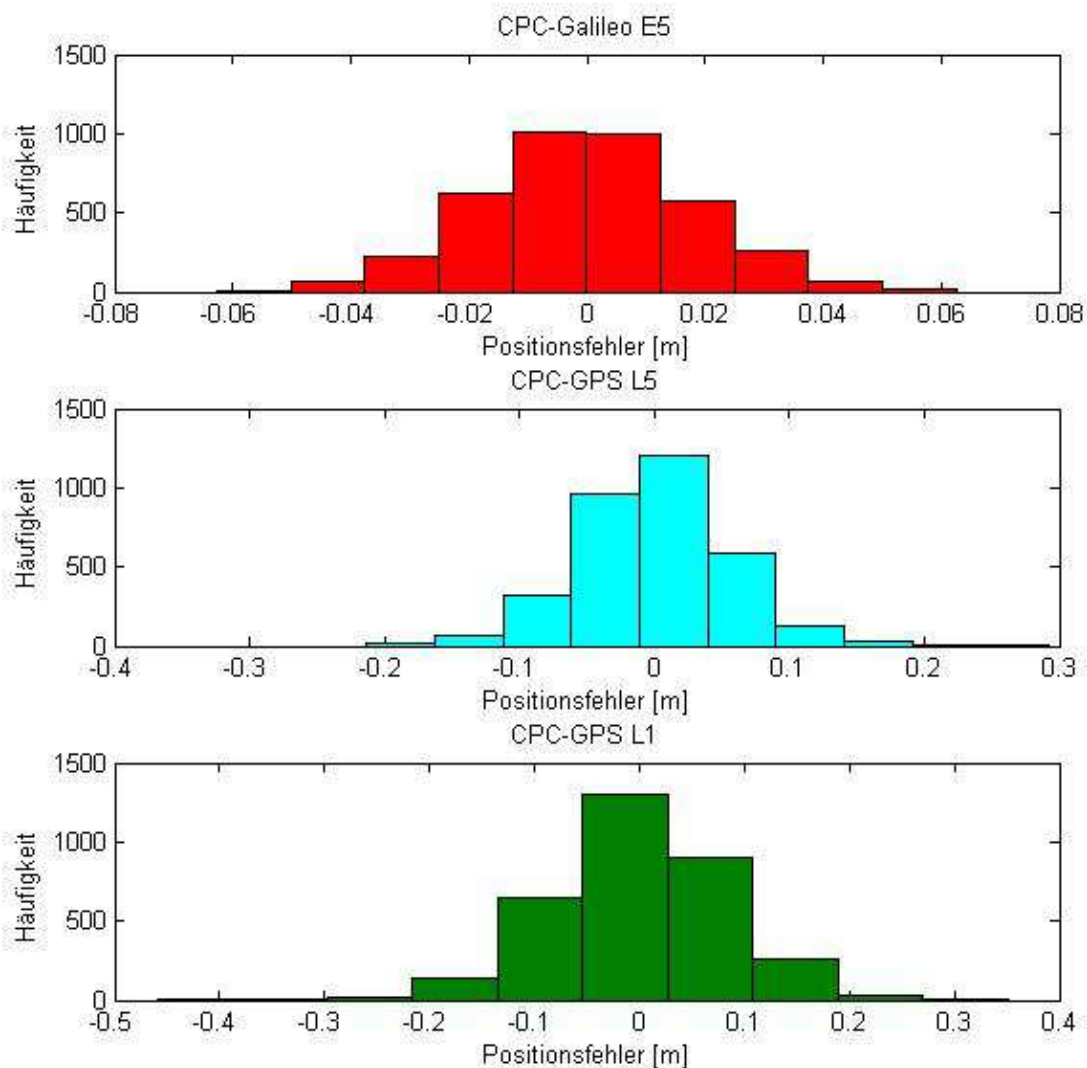


Abbildung 6-21: Verteilung der CPC-Positionsfehler für mittellange Basislinien-Positionierung

Die CPC-Positionsergebnisse über mittellange Basislinien sind etwas schlechter als diejenigen über kurze Basislinien. Die durchschnittlichen 3D RMS der CPC-Prozessierungen während einer Periode von einem Jahr liegen bei 2-5 cm. Diese leichte Verschlechterung der Positionsergebnisse erklärt sich daraus, dass die Mitigation der troposphärischen Fehler und anderer Fehler aufgrund der unterschiedlichen Bedingungen an den Stationen mit Restfehlern verknüpft ist. Diese

Restfehler schlagen jedoch nicht stark durch, so dass die Positionsergebnisse immer noch ausreichend genau sind.

Die statistischen Analysen der Ergebnisse über eine Messperiode von einem Jahr bestätigen diesen Umstand. Die Verteilungen der CPC-Positionsfehler (vgl. Abbildung 6-21) zeigen ähnliche Eigenschaften wie bei der kurzen Basislinien-Positionierung. Die Galileo E5-Fehler sind ebenfalls normalverteilt und die GPS (L1 und L5)-Fehler sind schief verteilt. Die Tabelle 6-5 zeigt ein paar statistische Kenngrößen für ausgewählte Tage des Jahres:

DoY	Minimaler Positionsfehler [cm]			Maximaler Positionsfehler [cm]			Mittelwert des Positionsfehlers [cm]			Standardabweichung [cm]		
	GPS L1	GPS L5	Gal E5	GPS L1	GPS L5	Gal E5	GPS L5	GPS L5	Gal E5	GPS L1	GPS L5	Gal E5
201												
2												
001	13,5	5,1	1,8	35,1	8,5	3,7	16,2	5,8	1,9	14,5	5,8	1,9
060	13,6	4,9	1,5	33,4	9,1	3,4	17,2	5,5	1,9	15	4,9	1,8
120	15,4	6,3	2,5	38,4	10,3	4,6	23,7	7,0	3,1	16,3	5,8	2
180	15,1	5,8	1,4	36,4	9,4	4,2	19,6	6,1	2,7	15,7	5,5	2,1
240	14,8	5,7	2,1	35,2	8,8	4,1	19,1	5,7	2,5	15,3	5,2	1,9
300	14,1	5,2	1,8	34,1	8,2	3,3	16,6	5,4	2,2	15	5,2	1,8
360	13,6	4,9	1,7	33	7,9	2,8	15,9	5,2	2,2	14,8	4,6	1,6

Tabelle 6-5: Statistische Kenngrößen der Genauigkeitsanalyse für eine mittellange Basislinie

Die Verlängerung der Basislinie bewirkt gleichzeitig eine geringfügige Erhöhung der saisonalen Variationen. Bei mittellangen Basislinien liegen die Stationen meist in der gleichen Klimazone, so dass die Auswirkungen von Klimafaktoren nicht wirklich signifikant sind. Dies spiegelt sich in den Werten der Variationen wider, (siehe Tabelle 6-6. Jahreszeitliche Veränderungen sowohl in der vertikalen als auch in der horizontalen Lage liegen weit unter 5 mm für Galileo E5-CPC-Positionsergebnisse, was von geringen saisonalen Variationen zeugt.

	Saisonale Variation [mm]		
	GPS L1	GPS L5	Galileo E5
Amplitude in Nordrichtung	6,3	3,2	2,8
Amplitude in Ostrichtung	6,4	3,1	2,8
Amplitude in der Höhe	8,7	4,0	3,5

Tabelle 6-6: Saisonale Variationen der Koordinaten-Komponenten über mittellange Basislinien

6.3.3 Einfrequenz-Positionierung über lange Basislinien

Mit der Erhöhung der Basislinienlängen sind die meisten Fehler an den Stationen kaum noch miteinander korreliert. Eine Eliminierung der redundanten Fehlereinflüsse durch die Bildung doppelter Differenzen ist hier fast unmöglich. In diesem Abschnitt

werden die Koordinaten der Station BRUS (Brüssel) mit Hilfe der Referenzstationen VALE (Valencia), OSLs (Oslo) und WROC (Wroclaw) berechnet. Die Basislinien zwischen den Stationen haben eine durchschnittliche Länge von ca. 1000 km, was eine sehr lange Basislinie darstellt (siehe Abbildung 6-22). Die Höhenunterschiede zwischen den Stationen erreichen eine vertikale Differenz von ca. 140 m. Diese Tatsache muss erwähnt werden, da sie eine erhebliche Auswirkung auf die troposphärische Laufzeitverzögerung hat, die sich mit zunehmender Höhe rasch verringert. Erfahrungsgemäß sinkt nämlich der Luftdruck jede 10 m um ca. 1 hPa; dies ergibt eine Druckdifferenz zwischen den Stationen von ca. 14 hPa, was immerhin eine hydrostatische Verzögerungsdifferenz von ca. 3 cm zwischen den Stationen verursacht. Folglich sind die troposphärischen Laufzeitverzögerungen, die auf die Stationen einwirken, zumeist unterschiedlich. Bei der präzisen Positionierung über lange Basislinien muss diese Gegebenheit beachtet werden und es müssen entsprechende Modellierungs- oder Mitigationsverfahren eingesetzt werden, um genaue Ergebnisse zu erzielen.

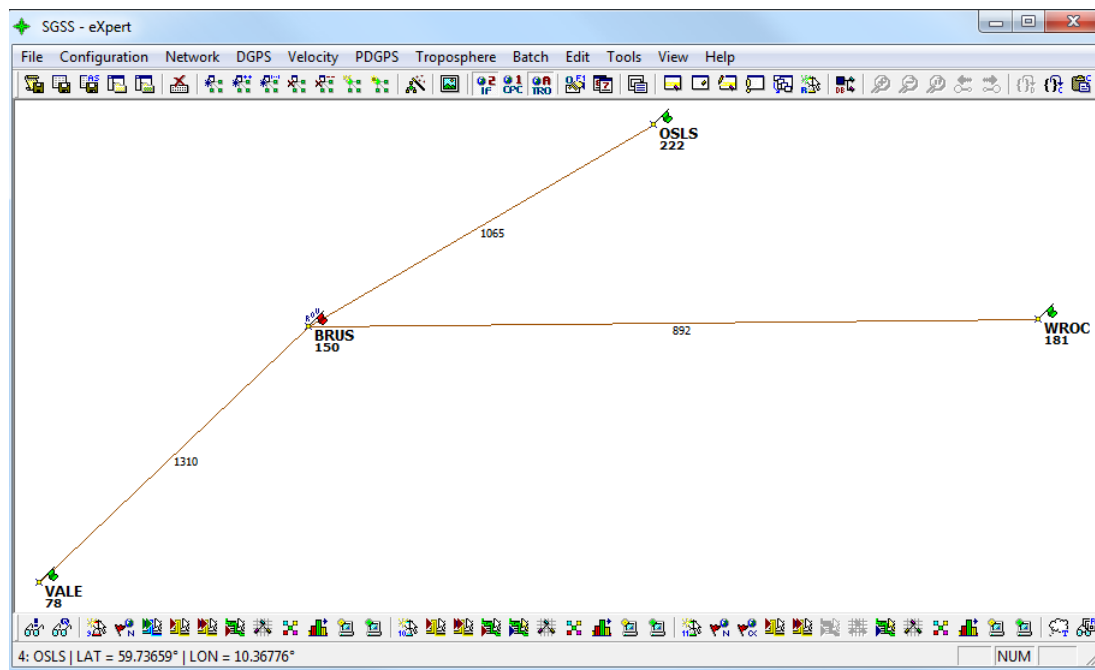


Abbildung 6-22: lange Basislinien-Prozessierungsanordnung

Wie für die anderen Basislinien werden Beobachtungsdaten (GPS L1 und L5 sowie Galileo E5) über eine Zeitspanne von einem Jahr hinweg - vom 01.01.2012 bis 31.12.2012 - mit einer Auflösung von 30 s prozessiert. Ein Vorteil der CPC-Methode ist, dass der ionosphärische Fehler 1. Ordnung unabhängig von der Basislinienlänge komplett eliminiert wird.

Bei langen Basislinien sind die CPC-Positionsergebnisse trotzdem deutlich schlechter als bei kurzen Basislinien. Bei der Einfrequenz-Positionierung über lange Basislinien können trotz der Bildung der doppelten Differenzen viele Fehler nicht mitigiert werden, weswegen hohe Restfehler die Genauigkeit der Positionsergebnisse belasten.

Die 3D RMS der Galileo E5-CPC-Prozessierungen während einer Periode von einem Jahr erreichen im Durchschnitt nur noch Werte von 5-8 cm. Diese Ergebnisse sind jedoch weiterhin um einiges besser als die GPS L1-Ergebnisse (30-60 cm) und L5-

Ergebnisse (10-20 cm). Die Tabelle 6-7 fasst statistische Kenngrößen für ausgewählte Beobachtungszeitpunkte des Jahres 2012 zusammen:

DoY 2012	Minimaler Positionsfehler [cm]			Maximaler Positionsfehler [cm]			Mittelwert des Positionsfehlers [cm]			Standardabweichung [cm]		
	GPS L1	GPS L5	Gal E5	GPS L1	GPS L5	Gal E5	GPS L5	GPS L5	Gal E5	GPS L1	GPS L5	Gal .E5
001	17,8	6,8	2,4	46,8	11,4	5	21,6	7,8	2,6	19,4	7,8	2,6
060	18,2	6,6	2	44,6	12,2	4,6	23	7,4	2,6	20	6,6	2,4
120	20,6	8,4	3,4	51,2	13,8	6,2	31,6	9,4	4,2	21,8	7,8	3,2
180	20,2	7,8	2,8	48,6	12,6	5,6	26,2	8,2	3,6	21	7,4	2,8
240	19,8	7,6	2,8	47	11,8	5,4	25,4	7,6	3,4	20,4	7	2,6
300	18,8	7,4	2,4	45,4	11	4,4	22,2	7,2	3	20	7	2,4
360	18,2	6,6	2,2	44	11	3,8	21,2	7	3	19,8	6,2	2,2

Tabelle 6-7: Darstellung der statistischen Kenngrößen der Genauigkeitsanalyse für eine lange Basislinie

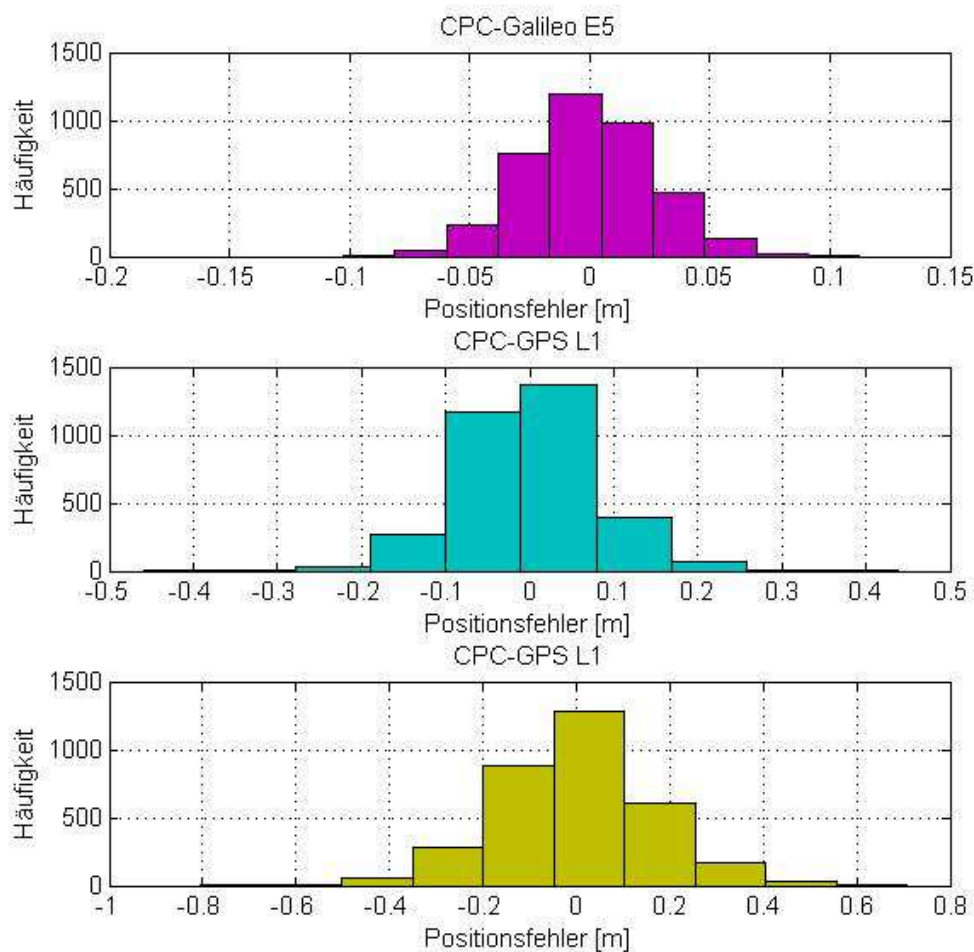


Abbildung 6-23: Verteilung der CPC-Positionsfehler für lange Basislinien-Positionierung

Die Histogramme in Abbildung 6-23 zeigen die Verteilung der Positionsfehler für Galileo E5, GPS L1 und L5. Sie lassen schließen, dass sich die Verteilung der Positionsfehler über lange Basislinien ebenfalls verschlechtert. Die Fehler sind nun bei den Galileo E5-Ergebnissen weniger symmetrisch verteilt. Die GPS-Fehlerverteilungen sind nach wie vor schief verteilt.

Eine andere Besonderheit bei der Einfrequenz-Positionierung über lange Basislinien ist die Unmöglichkeit, die Mehrdeutigkeiten der drei Frequenzen (auch für Galileo E5) zu lösen. Grund hierfür ist, dass das Messrauschen über lange Basislinien steigt und so die Mehrdeutigkeitsfixierung verhindert.

Zuletzt wird der Einfluss saisonaler Variationen auf die Positionsergebnisse über lange Basislinien analysiert (vgl. Tabelle 6-8). Da an den verschiedenen Stationen der langen Basislinien meist völlig unterschiedliche klimatische Faktoren vorherrschen, steigen die jahreszeitlichen Variationen der Positionsergebnisse. Die Variationen sind noch höher, wenn die Basislinien sich über küstennahe Stationen (mit erhöhtem Einfluss von Gezeiten und ozeanischen Auflasten) und von der Küste weit entfernte Stationen spannen.

	Saisonale Variation [mm]		
	GPS L1	GPS L5	Galileo E5
Amplitude in Nordrichtung	6,4	4,1	3,2
Amplitude in Ostrichtung	6,4	4,7	3,9
Amplitude in der Höhe	7,3	6,9	4,9

Tabelle 6-8: Saisonale Variationen der Koordinaten-Komponenten über lange Basislinien

Aus den Analysen kann das Fazit gezogen werden, dass sich die optimalen Einfrequenz-Positionsergebnisse über Basislinien bis zu 500 km ergeben. Außerdem spielen bei der CPC-Methode mit Galileo E5-Daten saisonale Variationen lediglich eine untergeordnete Rolle.

6.4 Einsatz von CPC während des Galileo-Aufbaus

Bei den bislang angestellten CPC-Berechnungen wurde von einer FOC-Konstellation ausgegangen, die voraussichtlich erst im Jahr 2020 fertiggestellt wird, (siehe Abbildung 1-2). Während der ersten Aufbauphase (der sog. IOC-Phase), die bis 2015 abgeschlossen sein soll, wird die Galileo-Konstellation hingegen nur aus 18 Satelliten bestehen. Daher wird im Folgenden untersucht, ob die CPC-Methode auch während der Galileo-Aufbauphase mit einer reduzierten Satellitenkonstellation präzise Positionen berechnen kann.

Als Übergangslösung könnte die Modernisierung der bestehenden GNSS (GPS, GLONASS), die die Entstehung neuartiger und robuster Signale zur Folge haben wird, einige Kombinationsperspektiven mit Galileo bieten. Noch interessanter könnte das chinesische COMPASS/BeiDou hinsichtlich einer Kombination mit dem Galileo E5-Signal sein, da wie schon in Unterkapitel 1.3 erwähnt, COMPASS/BeiDou viele Ähnlichkeiten zu Galileo aufweist (Der COMPASS-Frequenzplan überschneidet sich

teilweise mit demjenigen von Galileo). Da GPS L5 zumindest ähnliche Merkmale wie der Unterträger Galileo E5a hat, kann möglicherweise die Kombination der reduzierten Galileo-Konstellation (E5) sowie der GPS-Konstellation (L5) präzise Positionen erzielen. COMPASS/BeiDou deckt in einer ersten Phase die Asien-Pazifik Region ab und strebt bis zum Jahr 2020 eine globale Abdeckung an. Im folgenden Unterkapitel wird untersucht, welche Verbesserung eine Kombination der vollen Galileo-Konstellation mit der vollen COMPASS-Konstellation bringen wird.

Bevor simulierte Daten der verschiedenen GNSS-Konstellationen prozessiert werden, werden die Sichtbarkeit und die Verteilung der Satelliten über die Teststationen anhand der „Trimble Planning Software“⁵⁹ analysiert. Diese Software ermöglicht es, mit den Almanach-Daten der Satelliten diverse Analysen durchzuführen. Die Untersuchung mit der „Trimble Planning Software“ soll hauptsächlich die Fragen der Verschlechterung bzw. Verbesserung der Satellitengeometrie durch die Auswahl und Kombination verschiedener GNSS-Konstellationen beantworten. Dabei werden die typischen Signal-Eigenschaften, insbesondere der Mehrwegeeffekt, berücksichtigt. Empfänger-spezifische Fehler wie Interfrequenz-Biases, die aufgrund der schlechten Satellitenkonstellation auftreten können, werden hingegen in dieser Arbeit nicht diskutiert. Für die Güte der Satellitengeometrie werden die sog. DOP („Dilution of Precision“)-Werte verwendet. Der DOP ist für eine gegebene Satellitenkonstellation an einem bestimmten Ort ein Maß dafür, wie gut diese Konstellation zur Positionsberechnung geeignet ist. Dabei beschreibt der Wert 1 die bestmögliche geometrische Anordnung der Satelliten und ein Wert von ungefähr 6 bildet die obere Grenze für eine gute Satellitengeometrie. DOP-Werte größer als 10 lassen keine Auswertung mehr zu.

6.4.1 Reduzierte Galileo-Satellitenkonstellation

Bis 2015 (Ende der IOC-Phase) wird die Galileo-Konstellation nur aus 18 Satelliten bestehen, [Angabe der GSA⁶⁰, 2012]. Diese reduzierte Galileo-Konstellation wird mit den Kepler-Parametern aus den Almanac-Daten, die die GSA zur Verfügung gestellt hat, simuliert. Danach wird mit der „Trimble Planning Software“ eine Analyse der Sichtbarkeit und der Geometrie der Satelliten durchgeführt. Die Elevationsmaske der Satelliten ist auf 10° eingestellt, um die Multipath-Auswirkungen zu minimieren, da diese Effekte in niedrigeren Höhenlagen drastisch erhöht sind. Die Ergebnisse der Analyse werden in Abbildung 6-24 veranschaulicht.

Die Ergebnisse der aus 18 Satelliten bestehenden Galileo-Konstellation ergeben Unregelmäßigkeiten in der Sichtbarkeit der Satelliten: Es ist kaum möglich, mehr als vier Satelliten gleichzeitig zu beobachten, meist beträgt die Anzahl der beobachtbaren Satelliten weniger oder gleich vier (rote Streifen in der Sichtbarkeitsabbildung). Diese Tatsache spiegelt sich auch in den DOP-Werten wider, wobei häufig Werte über 20 erreicht werden. DOP-Werte größer als 10 erlauben wiederum keine

⁵⁹ Mehr Informationen über diese Software sind hier zu finden: http://www.trimble.com/planningsoftware_ts.asp, letzter Aufruf 06.12.2012

⁶⁰ GSA (European GNSS Agency) ist eine Regulierungsbehörde der EU, die für die Verwaltung der öffentlichen Interessen im Zusammenhang mit europäischen GNSS-Programmen zuständig ist.

Positionsberechnung. Für wenige kurze Beobachtungszeitfenster sind jedoch genügend Satelliten vorhanden, um CPC-Positionsberechnungen anzustellen.

Bei der Prozessierung der Galileo E5-Einfrequenz-Messdaten führt die „SGSS eXpert“-Software eine Qualitätskontrolle durch. Dieser Prozess erfordert die Berechnung der Residuen, die nur mit mehr als vier Satelliten möglich ist. Andernfalls verwirft der Berechnungsprozess die Messungen, die während der Zeit mit vier oder weniger Satelliten erfasst wurden. Damit die Daten aus der reduzierten Galileo-Konstellation trotzdem prozessiert werden können, wird diese Funktion ausgeschaltet. Dies sollte nicht der Regelfall sein, da die Zuverlässigkeit der Ergebnisse darunter leiden könnte.

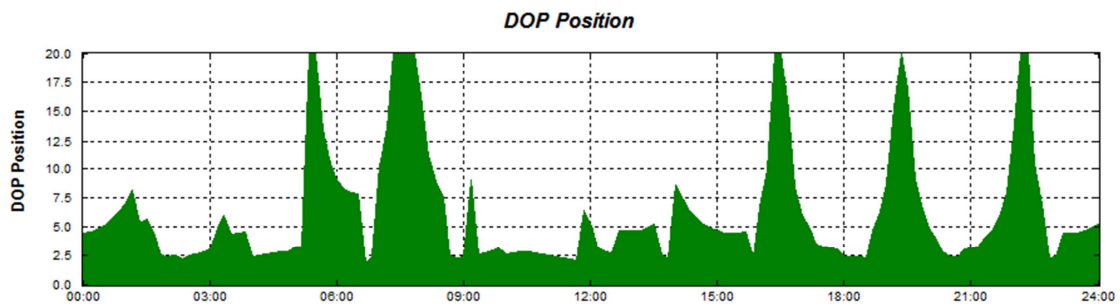
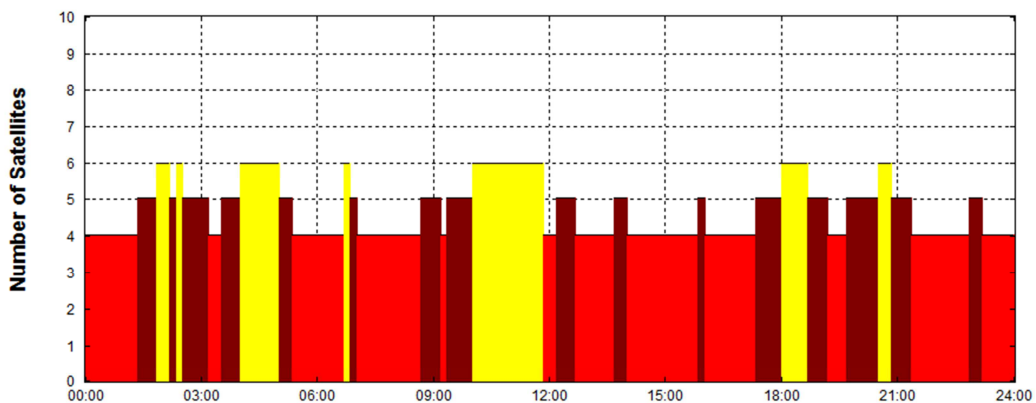


Abbildung 6-24: Analyse der Sichtbarkeit und Geometrie der Satelliten aus der reduzierten Galileo-Konstellation

Anhand von simulierten Daten werden die CPC-Positionen für drei Stationen aus den Testszenarien berechnet. Diese CPC-Positionierungsergebnisse werden in Abbildung 6-25 präsentiert. Aus ihr lässt sich auf den ersten Blick eine Verschlechterung der Ergebnisse erkennen: Anstatt der Zentimeter-Genauigkeiten bei den Berechnungen mit der vollen Galileo-Walker-Konstellation werden nunmehr lediglich Ergebnisse im Bereich einiger Dezimeter erzielt.

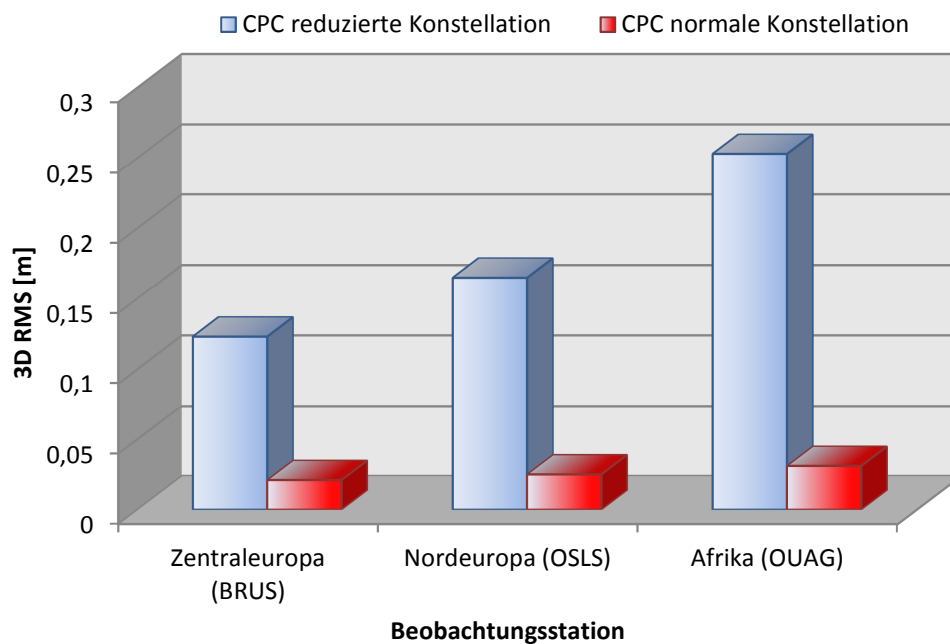


Abbildung 6-25: Die CPC-Positionierungsergebnisse bei reduzierter Galileo-Satellitenkonstellation

Der Abbildung 6-26 ist zu entnehmen, dass die weite Verstreuung der Positionierungsergebnisse auf die schlechte Sichtbarkeit und die damit verbundene schlechte Satellitengeometrie zurückzuführen ist.

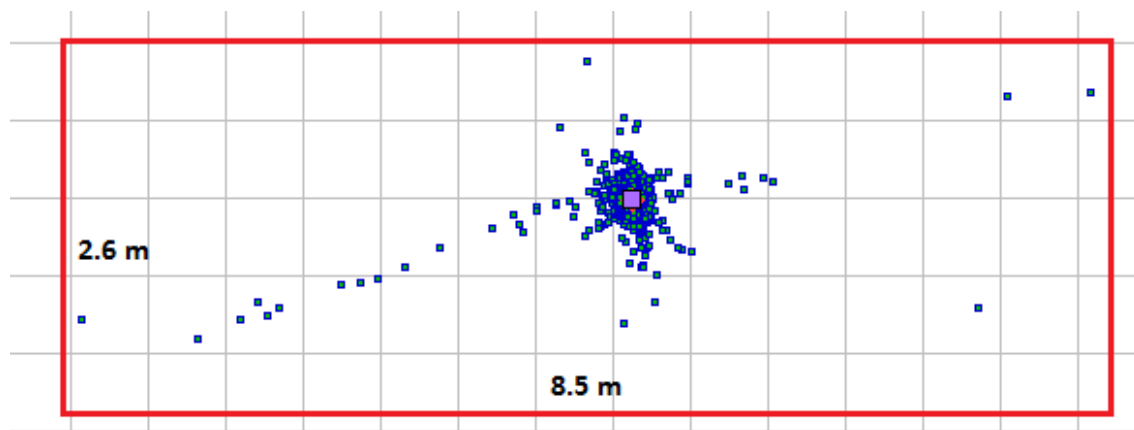


Abbildung 6-26: Punktstreuung der Galileo E5-CPC-Positionierungsergebnisse aus der reduzierten Satellitenkonstellation

Werden die CPC-Positionierungsergebnisse aus früheren Berechnungen bei einer Galileo-FOC-Konstellation betrachtet, ist festzustellen, dass eine Satellitenkonstellation von mindestens 24 Satelliten notwendig ist, um eine lückenlose globale Abdeckung zu gewährleisten und somit präzise Positionen berechnen zu können.

6.4.2 Reduzierte Konstellation aus Galileo- und GPS-Satelliten

Die CPC-Positionierungsergebnisse, die man mit Galileo-Daten aus der reduzierten Satellitenkonstellation während der IOC-Phase erhält, sind nicht zufriedenstellend. Das heißt, dass während der IOC-Phase keine präzise Positionierung mit der CPC-Methode möglich wäre. Wie bereits in Abschnitt 6.2.3 beschrieben, wurde aber im Zuge des Modernisierungsprozesses das GPS-L5-Signal implementiert, das mit dem Galileo E5a-Signal (Unterträger des breitbandigen Signals E5) vergleichbar ist. Die neuen Generationen von GPS IIF- und IIIA-Satelliten werden das L5-Signal ausstrahlen. Derzeit befinden sich vier GPS IIF-Satelliten im All und es sollen bis zum Jahr 2015 noch acht weitere folgen. Erst im Jahr 2020 soll voraussichtlich die gesamte GPS-Satellitenkonstellation - bestehend aus IIF- und IIIA-Satelliten - das L5-Signal ausstrahlen. Bei der aktuellen Startfrequenz der Satelliten ins All wird angenommen, dass im Jahr 2015 ca. acht GPS IIF-Satelliten operationell werden.

Es stellt sich nun die Frage, ob E5-Messungen aus der reduzierten Galileo-Konstellation (18 Satelliten) mit L5-Messungen aus acht GPS IIF-Satelliten kombiniert werden können, um eine präzise Positionierung mit der CPC-Methode durchzuführen. Hierauf soll die nachfolgende Analyse eine Antwort geben. Eine derartige Multi-Konstellation (IOC-Übergangskonstellation) würde aus 26 Satelliten (18 Galileo IOC-Satelliten + 8 GPS IIF-Satelliten) bestehen. Bei der Prozessierung wird nun der CPC-Beobachtungsvektor um die GPS L5-CPC-Beobachtungsgrößen erweitert:

$$\underline{L} = \begin{bmatrix} \left[\nabla \Delta CPC_{A,B,k,E5}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,B,k,E5}^{1,3} \dots \nabla \Delta CPC_{A,B,k,E5}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,B,k,E5}^{1,3} \dots \right]^T \\ \left[\nabla \Delta CPC_{A,B,k,L5}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,B,k,L5}^{1,3} \dots \nabla \Delta CPC_{A,C,k,L5}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,C,k,L5}^{1,3} \dots \right]^T \\ \left[\nabla \Delta CPC_{A,B,k+1,E5}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,B,k+1,E5}^{1,3} \dots \nabla \Delta CPC_{A,C,k+1,E5}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,C,k+1,E5}^{1,3} \dots \right]^T \\ \left[\nabla \Delta CPC_{A,B,k+1,L5}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,B,k+1,L5}^{1,3} \dots \nabla \Delta CPC_{A,C,k+1,L5}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,C,k+1,L5}^{1,3} \dots \right]^T \\ \vdots \\ \left[x_k, y_k, z_k, x_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1} \dots \right]^T \end{bmatrix} \quad (6-10)$$

Der Prozessierungsablauf entspricht im übrigen demjenigen, der in Abschnitt 2.5 beschrieben wurde. Die Auswirkungen der Kombination von Galileo-E5 und GPS-L5 auf die Empfänger-Technologie aufgrund der unterschiedlichen Mittelfrequenzen von L5 und E5 sind minimal, da ein E5-Empfänger auch das L5-Band abdeckt und sich die Signalverarbeitung unproblematisch gestaltet.

Mit der „Trimble Planning Software“ werden auch hier die Sichtbarkeit und die Geometrie der simulierten Kombination aus Galileo IOC-Satelliten und GPS IIF-Satelliten analysiert, vgl. Abbildung 6-27. Was die Sichtbarkeit angeht, stellt die Ergänzung der Galileo IOC-Konstellation durch einige GPS-Satelliten eine Verbesserung dar. Die Sichtbarkeit scheint (über einen Zeitraum von einem Tag hinweg) mit Ausnahme weniger Zeitfenster, in denen nur vier Satelliten zu sehen sind, ausgeglichen zu sein. Die hohen DOP-Werte (DOP-Mittelwert von ca. 6) erklären sich durch die inhomogene Verteilung der Satelliten.

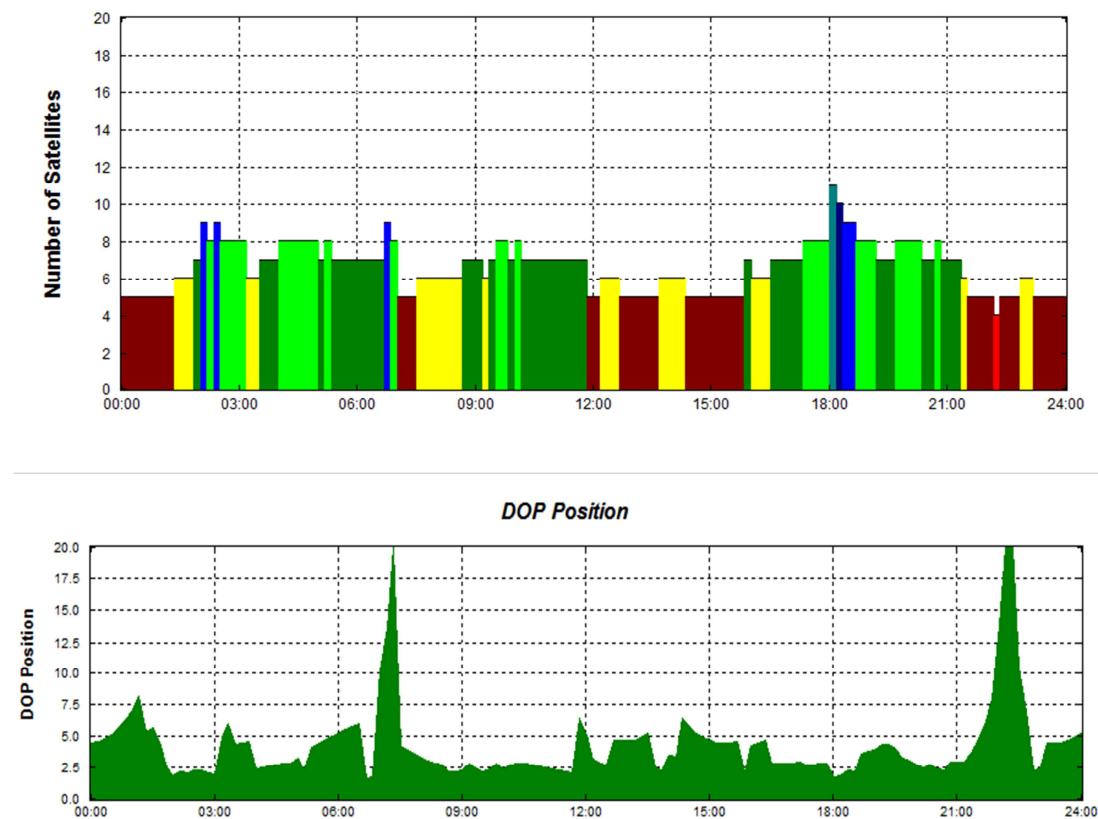


Abbildung 6-27: Analyse der Sichtbarkeit und Geometrie der Satelliten aus der reduzierten Galileo-Konstellation

Bei einem Vergleich der CPC-Positionsergebnisse aus der Konstellation Galileo + GPS in der IOC-Phase mit denjenigen aus der Galileo IOC-Konstellation mit nur 18 Satelliten ist eine Verbesserung der Ergebnisse zu verzeichnen. Die Genauigkeiten liegen nun im Subdezimeter-Bereich. Sie sind jedoch immer noch beinahe zweimal schlechter als die Ergebnisse aus der FOC-Konstellation, (siehe Abbildung 6-28). Ein wesentlicher Nachteil der Kombination von Galileo E5- und GPS L5-Messungen liegt in den unterschiedlichen Eigenschaften der L5- und E5- Signale.

Während das Galileo E5-Signal Codestreckenmessungen mit stark reduziertem Codemessrauschen und deutlich geringeren Multipath-Auswirkungen liefert, ist dies beim GPS L5-Signal nicht im selben Ausmaß der Fall. Da die Grundidee der CPC-Einfrequenz-Positionierungsmethode auf der Nutzung der Eigenschaften des E5 Breitband-Signals basiert, leidet die CPC-Lösung unter den Folgen der Kombination von E5- und L5-Messungen.

Durch die Ergänzung der Galileo IOC-Konstellation durch die potenziellen acht GPS IIF-Satelliten werden die geometrischen Probleme und die Sichtbarkeitsprobleme der Galileo IOC-Phase zwar reduziert, die CPC-Positionierungsergebnisse sind jedoch nicht ausreichend präzise.

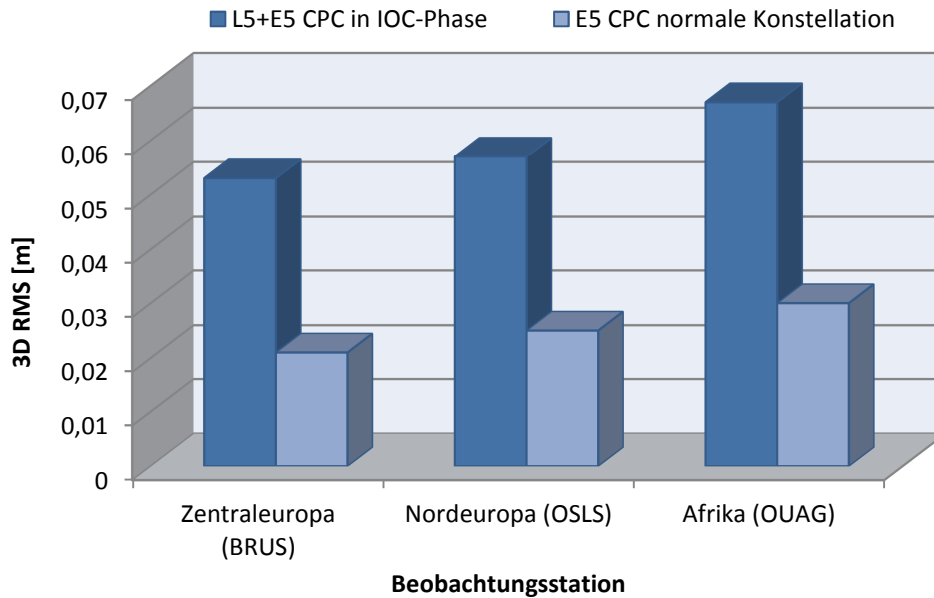


Abbildung 6-28: CPC-Positionierungsergebnisse bei Kombination von Galileo E5- und GPS L5-Daten während der IOC-Phase

6.4.3 Multi-Konstellationslösung (Galileo + COMPASS/BeiDou)

COMPASS/BeiDou ist das chinesische Satellitennavigationssystem. Die zweite Generation des Systems (auch als BEIDOU-2 bekannt) wird ein globales Satelliten-Navigationssystem sein und nach der Fertigstellung im Jahr 2020 aus 35 Satelliten bestehen (vgl. Abschnitt 1.3). COMPASS/BeiDou strahlt seine Signale auf drei Frequenzbändern aus: B1(E1), B2(E5) und B3(E6), die die Frequenzbänder von Galileo großen teils überschneiden (siehe Abbildung 6-29).

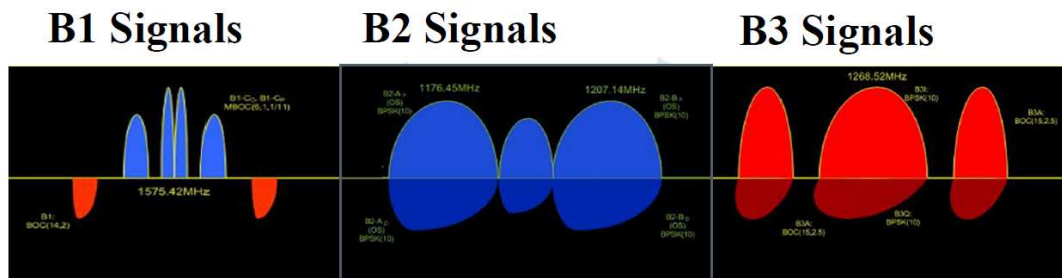


Abbildung 6-29: COMPASS-Frequenzplan, GUCANG [2011]

Mehrere Spektrumsanalysen zeigten, dass COMPASS/BeiDou ein Signal mit der gleichen zentralen Frequenz und Modulation wie Galileo E5 ausstrahlt (siehe Tabelle 1-2). Die Abbildung 6-30 stammt aus offiziellen Quellen des COMPASS-Entwicklers (GUCANG C., chinesischer Vertreter beim Munich Satellite Summit 2012) und bestätigt, dass COMPASS/BeiDou mit B2 ein Signal mit den gleichen Eigenschaften (breitbandig, AltBOC (15, 10)-Modulation) wie das Galileo E5-Breitband-Signal sendet.

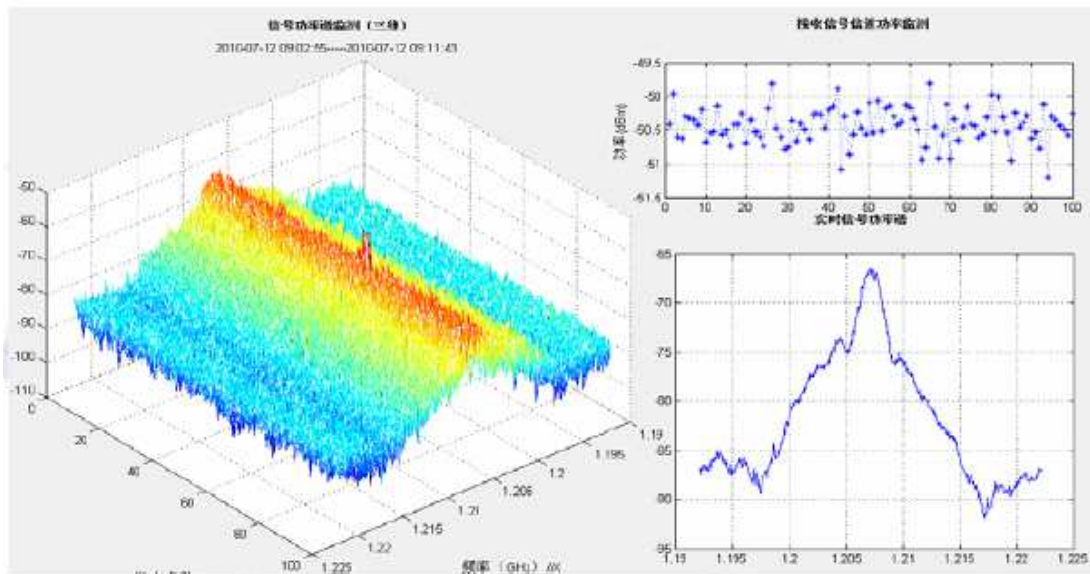


Abbildung 6-30: Spektrumsanalyse des B2-Signals, GUCANG [2011]

Nach einem Leitartikel in der Fachzeitschrift „GPS World [April 2008, pp. 27]“ könnte die Überlappung der Signale im Hinblick auf das Empfänger-Design sehr praktisch sein, andererseits steigt das Risiko von Inter-System-Störungen, falls es doch kleine Abweichungen im Signaldesign gäbe. Das COMPASS/BeiDou ICD-Dokument wurde Ende 2012 veröffentlicht und gibt detaillierte Auskünfte über den Signalplan⁶¹.

Bei der Fertigstellung der beiden Systeme im Jahr 2020 werden 54 (27 Galileo- und 27 COMPASS/BeiDou-) MEO-Satelliten mit einem E5/B2 AltBOC-Signal verfügbar sein. Dies bedeutet, dass jeder dieser 54 sichtbaren Satelliten ein Signal mit sehr geringem Codemessrauschen und extrem niedrigen Mehrwege-Auswirkungen ausstrahlen wird und daher optimale Bedingungen für präzise Einfrequenz-Positionierung schaffen wird. Aufgrund der Tatsache, dass Galileo E5 und COMPASS B2 die gleichen Eigenschaften aufweisen, können sie in der Signalprozessierung und in der Positionsberechnung als gleichwertig betrachtet werden.

In Abbildung 6-31 sind die Ergebnisse der geometrischen Analyse und der Sichtbarkeitsanalyse der kombinierten COMPASS/BeiDou - und Galileo-Satelliten ersichtlich. Die Kombination der beiden Satellitenkonstellationen führt zu einer klaren Verbesserung der Sichtbarkeit und Geometrie der Satelliten: An jedem Punkt der Erde werden zwischen 10 und 18 Satelliten gleichzeitig sichtbar. Würden dazu die GEO- und IGSO-Satelliten betrachtet, dürften in manchen Regionen der Erde (Asien und Pazifikregion) noch einige Satelliten mehr zu empfangen sein. Die DOP-Werte betragen durchschnittlich 1,8. Dies entspricht einer annähernd perfekten Satellitengeometrie.

⁶¹Siehe <http://www.beidou.gov.cn/attach/2012/12/27/201212275f2be9ad57af4cd09c634b08d7bc599e.pdf>

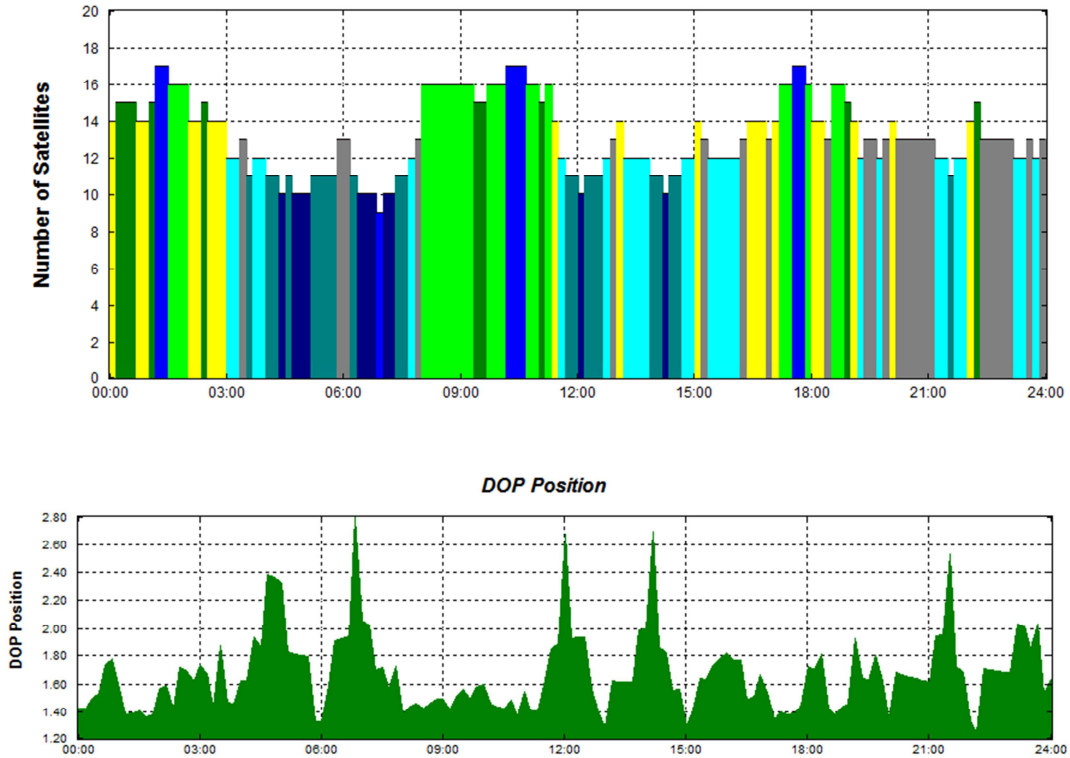


Abbildung 6-31: Analyse der Sichtbarkeit und Geometrie der Satelliten aus der reduzierten Galileo-Konstellation

Zum Zeitpunkt der Simulation der Daten lagen nur sehr wenige Informationen über die tatsächlichen Eigenschaften des B2-Signals vor, so dass Angaben über Details der Signalstrukturen nicht in die Datensimulation einfließen konnten. Das COMPASS/BeiDou ICD wurde offiziell Ende Dezember 2012 veröffentlicht und bestätigte alle Annahmen über das B2-Signal. Somit wurden in der Simulation COMPASS B2-Daten genau mit den gleichen Eigenschaften und der gleichen Art wie die Galileo E5-Daten generiert, d.h. es wurde das Simulations-Template von E5 für B2 verwendet. Bei der Positionsberechnung werden die COMPASS B2-Beobachtungen zum Positionsvektor hinzugefügt:

$$\underline{L} = \begin{bmatrix} \left[\nabla \Delta CPC_{A,B,k,E5}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,B,k,E5}^{1,3} \dots \nabla \Delta CPC_{A,B,k,E5}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,B,k,E5}^{1,3} \dots \right]^T \\ \left[\nabla \Delta CPC_{A,B,k,B2}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,B,k,B2}^{1,3} \dots \nabla \Delta CPC_{A,C,k,B2}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,C,k,B2}^{1,3} \dots \right]^T \\ \left[\nabla \Delta CPC_{A,B,k+1,E5}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,B,k+1,E5}^{1,3} \dots \nabla \Delta CPC_{A,C,k+1,E5}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,C,k+1,E5}^{1,3} \dots \right]^T \\ \left[\nabla \Delta CPC_{A,B,k+1,B2}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,B,k+1,B2}^{1,3} \dots \nabla \Delta CPC_{A,C,k+1,B2}^{1,2}, \nabla \Delta CPC_{A,C,k+1,B2}^{1,3} \dots \right]^T \\ \vdots \\ \left[x_k, y_k, z_k, x_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1} \dots \right]^T \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} (6- \\ 10 \\) \end{matrix}$$

Die CPC-Einfrequenz-Positionslösungen werden mit Galileo E5- und COMPASS B2-Daten berechnet. Die Abbildung 6-32 vergleicht deren Ergebnisse mit den allein aus Galileo E5-Daten berechneten CPC-Lösungen. Sie lässt schließen, dass sich die Erhöhung der Anzahl der Satelliten bezahlt macht: Die Genauigkeit der CPC-

Positionen steigt sich beinahe um den Faktor 2. Die CPC-Methode ist nun in der Lage, Koordinaten im Bereich von 1 cm zu liefern.

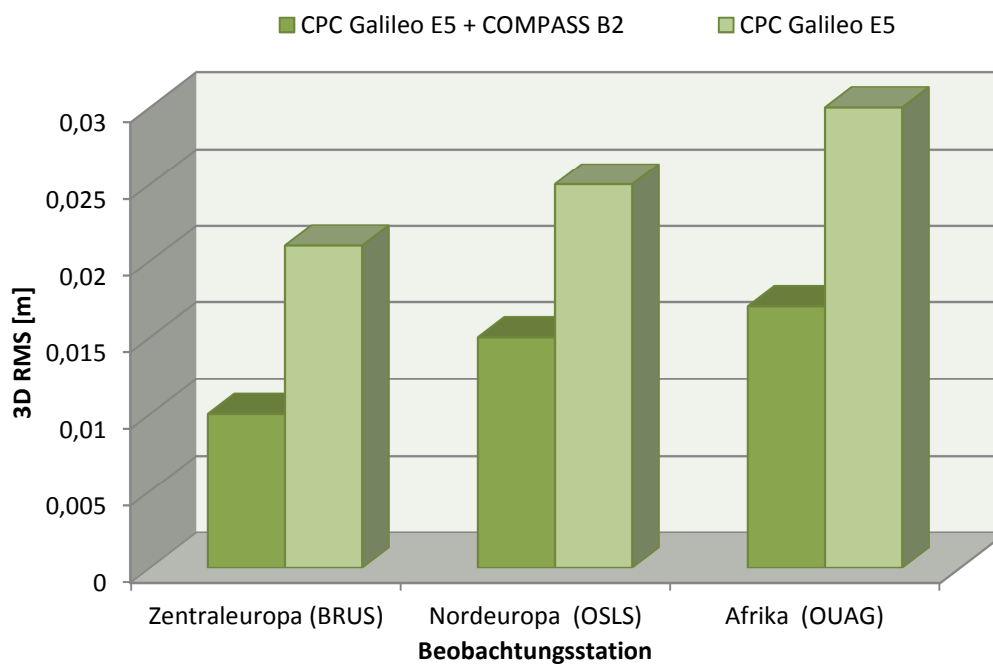


Abbildung 6-32: CPC-Positionierungsergebnisse aus der Kombination von Galileo E5- und COMPASS-B2-Daten während der FOC-Phase

Die Kombination der Galileo E5- und COMPASS B2-Signale könnte - soweit sich die Annahmen über COMPASS B2 bewahrheiten - in der Zukunft eine Schlüsselrolle bei der Erhöhung der Genauigkeit der Einfrequenz-Positionierung spielen. Darüber hinaus scheint der COMPASS/BeiDou-Aufbau schneller als offiziell geplant voranzukommen. Bei einer früheren Fertigstellung von COMPASS/BeiDou vor Galileo könnte die Methode der CPC-Einfrequenz-Positionierung sowohl mit Galileo E5 als auch mit COMPASS B2 die gleichen Ergebnisse erzielen.

6.5 RCF-Positionsergebnisse

Bei den bisherigen Berechnungen der CPC-Positionsergebnisse kam zum Vorschein, dass eine negative Eigenschaft dieser Einfrequenz-Positionierungsmethode die relativ lange Konvergenzzeit der Parameter ist. Ohne die Festsetzung der Mehrdeutigkeitsterme werden Positionsergebnisse im Zentimeter-Bereich erst ab einer dreistündigen Beobachtungszeit geliefert. Mit der Mehrdeutigkeitsfixierung kann diese Zeit auf ca. 20 min reduziert werden. Problematisch erscheint hier, dass viele präzise GNSS-Positionierungsanwendungen Zentimeter-Genauigkeiten in Echtzeit bzw. nahezu Echtzeit (d.h. in weniger als 5 min) erfordern.

In Kapitel 2.6 wurde die sog. „Rapid Convergence Filter (RCF)“-Methode beschrieben, die in sehr kurzer Zeit präzise Einfrequenz-Positionsergebnisse liefern kann. Wie dort bereits aufgezeigt, wird mit der RCF-Methode die ionosphärische Laufzeitverzögerung grundsätzlich nicht wie bei der CPC-Methode eliminiert. Stattdessen werden alle Störparameter wie die troposphärischen und ionosphärischen

Laufzeitverzögerungen sowie die Mehrdeutigkeitsparameter als zusätzliche Unbekannte durch einen Kalman-Filter geschätzt. Dabei werden die Codestreckenmessungen und die Trägerphasenmessungen als Teile des Beobachtungsvektors (siehe Gleichung 2-58) anstatt ihrer linearen Kombinationen betrachtet. Die Konvergenzzeit der Einfrequenz-Positionsergebnisse hängt stark von der Genauigkeit der Codestreckenmessungen ab, die für Galileo E5 deutlich besser ist als für andere GNSS-Signale. Die folgenden Abschnitte stellen zwei Simulationsexperimente vor, die die Fähigkeit und die Vorteile der RCF-Methode zeigen sollen.

6.5.1 Experiment 1: Kurzes Basislinien-Testszenario

Eine kurze Basislinie mit einer Länge kleiner als 1 km wird auf dem Gelände der UniBwM gebildet (siehe Abbildung 6-33). Die troposphärischen und ionosphärischen Laufzeitverzögerungen sind an beiden Stationen nahezu identisch, so dass diese Verzögerungen durch die Bildung von doppelten Differenzen effektiv eliminiert werden können.

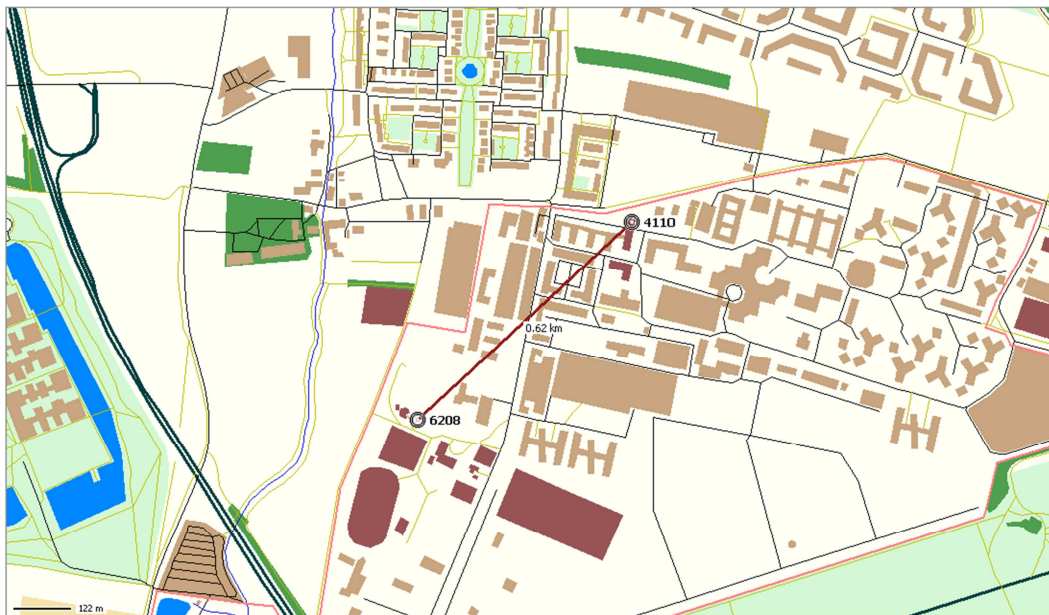


Abbildung 6-33: Kurze Basislinie auf dem Gelände der UniBwM zwischen 4110 (Dach eines Gebäudes) und 6208 (Messpfeiler) zum Testen der RCF-Methode

Folglich kann der Filter eingeschränkt werden und die Prozessrauschen werden entsprechend der Tabelle 6-9 konfiguriert. Bei der Initialisierung des Filters sind nur die atmosphärischen Laufzeitverzögerungen als genau "bekannt" zu betrachten, d.h. ihre Werte sind auf nahe Null zu setzen. Die initialen Koordinaten sind als fehlerhaft anzusehen. Da sie hier aus einer Datenbank stammen, werden sie absichtlich um 5 m verfälscht und ihre Standardabweichung sogar auf 9 m festgesetzt. Die Zustände der Mehrdeutigkeiten werden willkürlich mit 99 Zyklen initialisiert, obwohl die Anfangswerte normalerweise besser sein sollten. Alle Zustände werden als stochastische Prozesse im Zeitbereich modelliert. Für die Koordinaten und die atmosphärischen Laufzeitverzögerungen werden kleine Prozessrauschen-Werte von 1 bis $2 \text{ mm}/\sqrt{h}$ (statisches Szenario) gewählt, was dazu führt, dass kleine Variationen zugelassen werden.

Parameter	Initialisierung	Prozessrauschen	Constraints
Koordinaten	9 m	0.1 cm/ \sqrt{h}	
Troposphäre	0.001 m	0.2 cm/ \sqrt{h}	0.001 m
Ionosphäre	0.001 m	0.2 cm/ \sqrt{h}	0.001 m
Mehrdeutigkeit	99 cyc	0.0 cyc/ \sqrt{h}	

Tabelle 6-9: Kurze Basislinien-Konfiguration des RCF-Filters mit der Annahme minimaler atmosphärischer Fehler

Es wird angenommen, dass sich die Zustände der Mehrdeutigkeiten nicht verändern. Schließlich können atmosphärische Laufzeitverzögerungen von Korrekturmodellen (z.B. IONEX Maps) als sog. „Constraints“ eingesetzt werden, um den Filter zu unterstützen und die Parameter-Konvergenz zu beschleunigen. Hier wird eine kleine Standardabweichung für die „Constraints“ angenommen, da die atmosphärischen Fehler bei einer kurzen Basislinie durch doppelte Differenzbildung gegen Null tendieren. Der Parameter „Troposphäre“ bezeichnet die stationsspezifische Zenit-Residue (ZRD), wohingegen der Parameter „Ionosphäre“ den satellitenspezifischen doppelt differenzierten „Slant“-Fehler ausdrückt.

Zunächst werden RCF-Einfrequenz-Positionsergebnisse unter Verwendung von Galileo E1 (ähnlich GPS L1)-Messungen, die erheblich mehr Codemessrauschen und Multipath-Fehler als E5-Codemessungen aufweisen, berechnet. Abbildung 6-34 zeigt, dass es hierbei möglich ist, eine mehrdeutigkeitsfixierte Position zu erhalten: Die dunkelgelbe Zeitreihe - eine fast horizontale Linie - zeigt eine stabile Epoche-zu-Epoche-Lösung unter Verwendung der ganzzahligen Mehrdeutigkeiten.

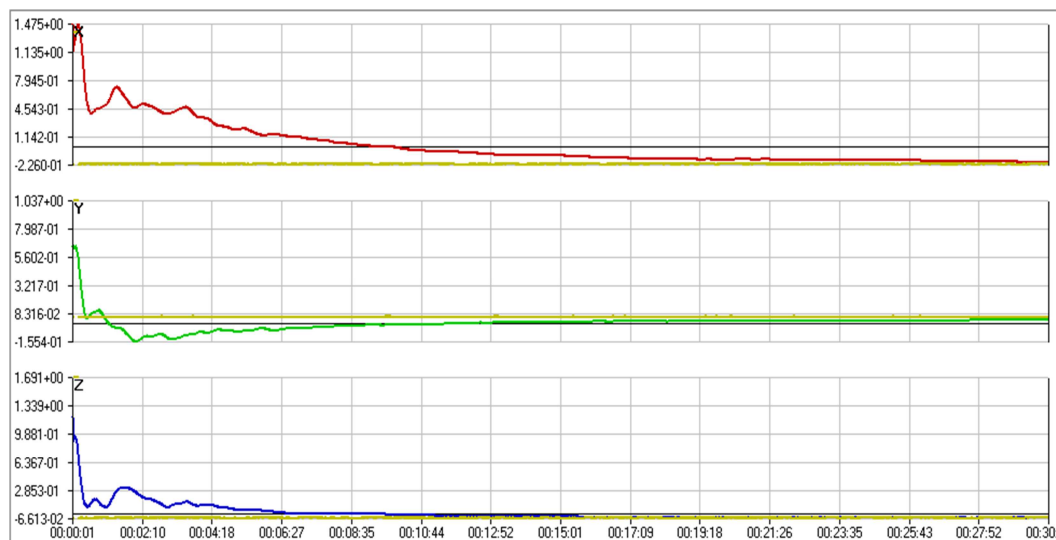


Abbildung 6-34: RCF-Positionsergebnisse unter Verwendung von Galileo E1-Messungen; die rote (X) bzw. grüne (Y) bzw. blaue (Z) Linie zeigt die Ausgaben des sequentiellen Filters, die dunkelgelben Zeitreihen die mehrdeutigkeitsfixierte Einzelepochen-Lösung; die vertikale Skala $-6.613 \cdot 10^{-2}$ wird als $-6.613 \cdot 10^{-2}$ m gelesen; die horizontale Skala ist im GPS-Zeitformat hh:mm:ss.

Die Positionslösung des sequentiellen Filters ist in Abbildung 6-34 in Rot (X-Komponente), grün (Y-Komponente) und blau (Z-Komponente) dargestellt. Nach

einer Epoche (1 s) der Daten verringert sich der Positionsfehler (zunächst ca. 5 m) auf etwa 1 m und es kann eine klare Parameterkonvergenz beobachtet werden.

Aus Abbildung 6-35 (nur die X-Koordinatenkomponente), die nur die erste Minute der Datenprozessierung zeigt, wird ersichtlich, dass etwa 13 Sekunden benötigt werden, bis eine stabile (und richtige) mehrdeutigkeitsfixierte Positionslösung zustande kommt. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass eine gewisse Zeit benötigt wird, um zunächst genügend korrekte „Float“-Positionslösungen zu berechnen und hierauf die mehrdeutigkeitsfixierten Positionslösungen zu schätzen.

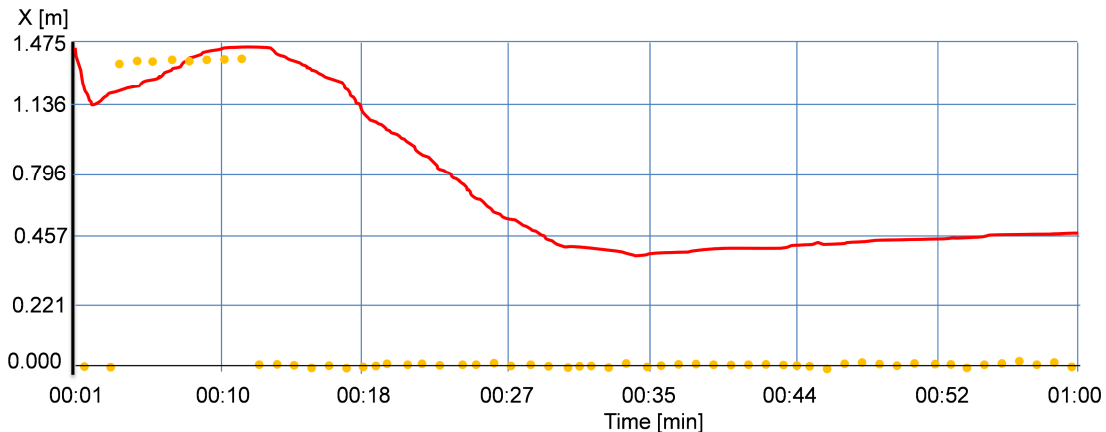


Abbildung 6-35: Konvergenz der Position (X-Komponente) unter Verwendung von Galileo E1-Messungen; Vergrößerung der Abbildung 6-34 (erste Minute der Beobachtung); die dunkelgelben Punkte zeigen die mehrdeutigkeitsfixierten Einzelperioden-Lösungen

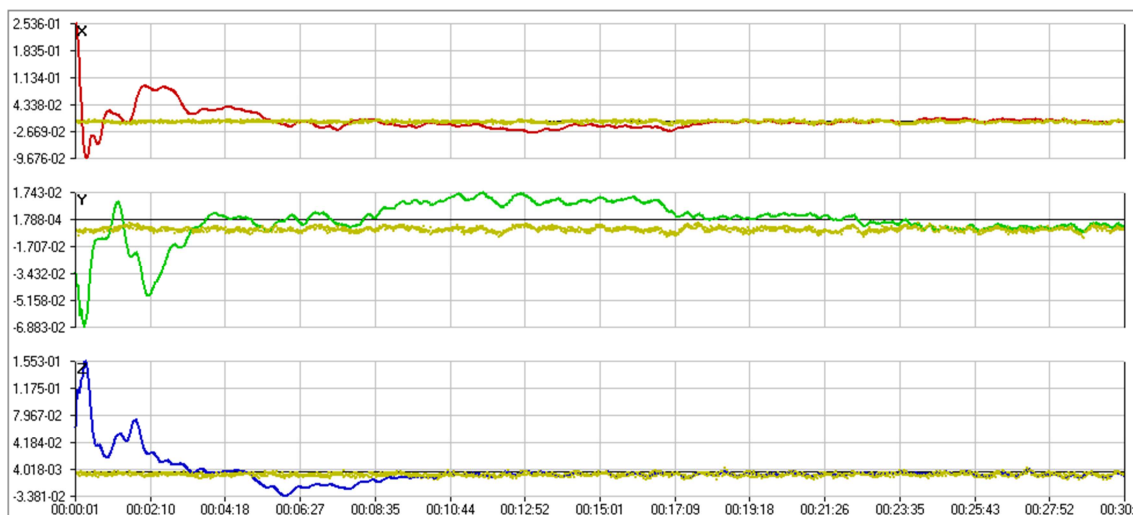


Abbildung 6-36: RCF-Positionsergebnisse unter Verwendung von Galileo E5-Messungen; die rote (X) bzw. grüne (Y) bzw. blaue (Z) Linie zeigt die Ausgaben des sequentiellen Filters, die dunkelgelben Zeitreihen die mehrdeutigkeitsfixierte Einzelperioden-Lösung

Wird die RCF-Einfrequenz-Positionierung mit Galileo E5-Messungen durchgeführt, zeigen Abbildung 6-36 und Abbildung 6-37 eindrucksvoll die Überlegenheit der E5-Lösungen gegenüber den E1-Lösungen: Eine korrekte mehrdeutigkeitsfixierte Epochenlösung wird beinahe unverzüglich (um genauer zu sein: mit einer Verzögerung von einer einzigen Epoche) berechnet.

Die Galileo E5-Pseudostrecken sind so präzise, dass die Lösung des sequentiellen Filters sehr schnell zur Soll-Position (Null-Abszisse in den Diagrammen) konvergiert. Die Konvergenz ist erheblich schneller als diejenige der Galileo E1-Lösung, obwohl auch hier Multipath-Fehler vorhanden sind, die in Form einiger Schwingungen in den Zeitreihen ersichtlich sind. Diese Variationen sind jedoch relativ klein – sie belaufen sich in der Regel auf wenige Zentimeter.

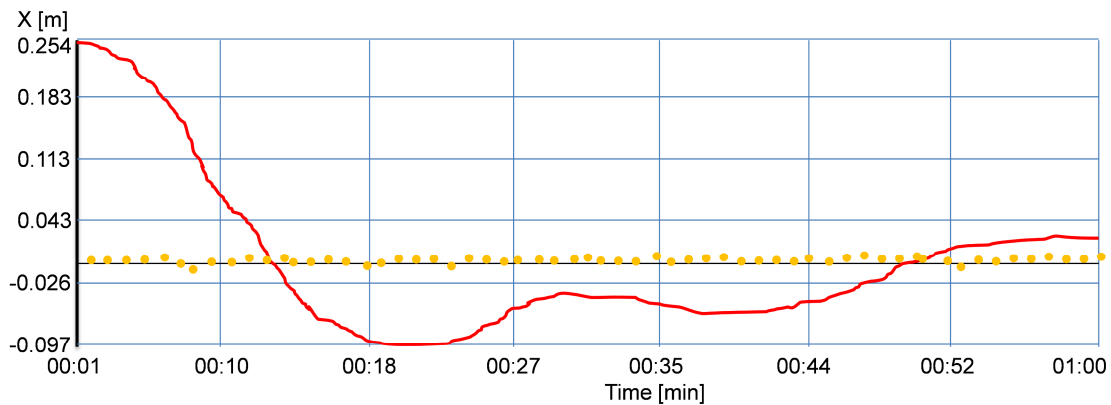


Abbildung 6-37: Konvergenz der Position (X-Komponente) unter Verwendung von Galileo E5-Messungen; Vergrößerung der Abbildung 6-36 (erste Minute der Beobachtung); die dunkelgelben Punkte zeigen die mehrdeutigkeitsfixierten Einzelperioden-Lösungen

6.5.2 Experiment 2: Mittellange Basislinie

In einem zweiten Versuch werden weiterhin die Daten des zuvor beschriebenen kurzen Basislinien-Experiments verwendet, aber der Filter wird anders konfiguriert: Er wird so initialisiert, dass die Konfiguration derjenigen ähnelt, die bei einer längeren Basislinie von etwa 100 bis 300 km vorgefunden wird, siehe Tabelle 6-10. Damit soll verdeutlicht werden, wie eine präzise mehrdeutigkeitsfixierte Positionslösung unter widrigen atmosphärischen Bedingungen mit der RCF-Methode zu erhalten ist.

Parameter	Initialisierung	Prozessrauschen	Constraints
Koordinaten	9 m	0.1 cm/ \sqrt{h}	
Troposphäre	0.06 m	2.0 cm/ \sqrt{h}	0.06 m
Ionosphäre	0.8 m	10.0 cm/ \sqrt{h}	1.0 m
Mehrdeutigkeitsens	99 cyc	0.0 cyc/ \sqrt{h}	

Tabelle 6-10: Konfiguration des RCF-Filters unter Annahme von signifikanten atmosphärischen Fehlern bei mittellangen Basislinien

Über mittellange Basislinien stellen die atmosphärischen Laufzeitverzögerungen ein großes Hindernis für die präzise Positionierung dar. Dennoch stehen für die Mitigation der troposphärischen Laufzeitverzögerungen verhältnismäßig gute externe Datenquellen zur Verfügung. Die troposphärischen Laufzeitverzögerungen können z.B. gut aus numerischen Wettermodellen abgeleitet werden. Derartige Ableitungen führen zu Positionsfehlern mit einer Standardabweichung in Zenitrichtung von etwa 2 cm. Bei der Initialisierung des Filters wird eine Genauigkeit von 6 cm angenommen,

da es immer wieder Stationen mit Störfaktoren gibt. Dieser hohe Wert ist jedoch in den meisten Fällen etwas pessimistisch. Hinsichtlich der ionosphärischen Laufzeitverzögerungen wird bei der Initialisierung ein Fehler von 8 dm festgelegt.

Die Werte für das Prozessrauschen sind $2 \text{ cm} / \sqrt{h}$ für die troposphärischen Residuen in Zenitrichtung (ZRD) - erfahrungsgemäß ein realistischer Wert für die meisten mittlere Breiten-Szenarien - und $10 \text{ cm} / \sqrt{h}$ für die Ionosphäre. Da die troposphärischen Laufzeitverzögerungen aus Wettermodellen abgeleitet werden, werden die Troposphäre-bezogenen „Constraints“ mit einer Standardabweichung von 6 cm als genau festgesetzt, wohingegen für die ionosphärischen Laufzeitverzögerungen eine Standardabweichung von 1 m angenommen wird, was wiederum dem Ionosphäre-Modell ein relativ schwaches Gewicht in den Filtergleichungen gibt. Damit werden die ionosphärischen Laufzeitverzögerungen weitgehend aus den Codestrecken- und Trägerphasenmessungen abgeleitet.

Abbildung 6-38 zeigt, dass die rauschreichen E1-Codemessungen nicht ausreichend genau sind, um eine stabile mehrdeutigkeitsfixierte Einfrequenz-Positionslösung innerhalb von 30 min zu liefern: Die ionosphärischen Laufzeitverzögerungen können nur mit Werten von ca. 1 dm genau geschätzt werden, was kritisch für das gesamte Fehlerbudget ist (die Trägerphasenmessung muss $0,1 \cdot \lambda \dots 0,3 \cdot \lambda$ ($\approx 2 \dots 8 \text{ cm}$ für E5) betragen, um eine Mehrdeutigkeitslösung zu erlauben). Die Mehrdeutigkeits-Diskriminationstests-Ratio erreicht Werte um 1,15 - sie müsste jedoch mindestens 2 betragen, um den Prozess zu befähigen, eine erfolgreiche Diskrimination des besten vom zweitbesten Satz der ganzzahligen Mehrdeutigkeiten durchzuführen. Dieser Umstand wird auch durch die Mehrdeutigkeits-Erfolgsrate (untere Grenze) unterstrichen, die nach 30 min einen Wert von nur 0,89 erreicht (Dieser Wert wird erfahrungsgemäß oft zu optimistisch geschätzt) (siehe Abbildung 6-39).

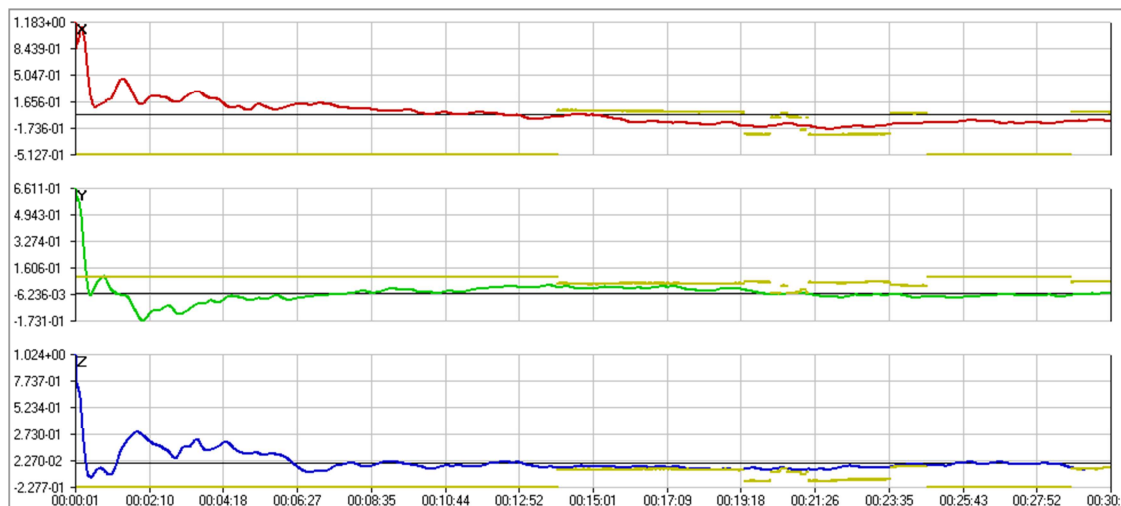


Abbildung 6-38: Konvergenz der Position (X Y Z-Komponente) unter Verwendung von Galileo E1-Messungen; die rote (X) bzw. grüne (Y) bzw. blaue (Z) Linie zeigt die Ausgaben des sequentiellen Filters und die dunkelgelben Linien zeigen die mehrdeutigkeitsfixierten Einzelperioden-Lösungen

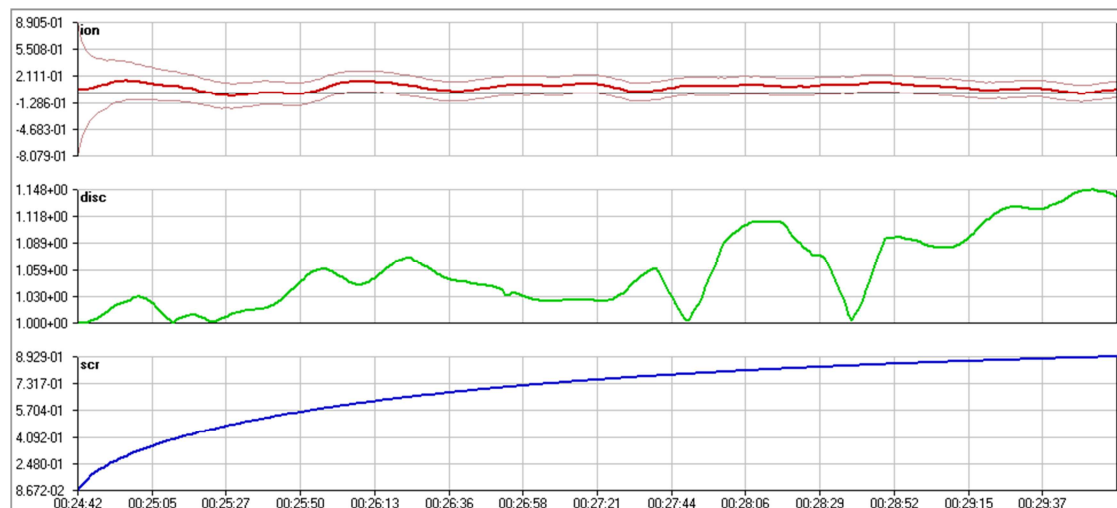


Abbildung 6-39: Ionosphärische Laufzeitverzögerungsschätzungen („ion“ in Meter) mit Standardabweichungs-Grenzwerten für einen zufällig gewählten Satelliten, Mehrdeutigkeits-Diskriminationstests-Ratios („disc“) und Mehrdeutigkeits-Erfolgsraten („scr“)

Im Gegensatz zu den E1-Ergebnissen sind die Positionsergebnisse durch die Verwendung von Galileo E5-Codestrecken- und Trägerphasenmessungen wesentlich besser, selbst wenn auch hier eine gewisse Konvergenzzeit benötigt wird, um stabile Positionen zu erzielen: Etwa 5 Minuten werden benötigt, bis die mehrdeutigkeitsfixierten Positionen keine Positionssprünge mehr anzeigen (siehe Abbildung 6-40: Zeitfenster von 30 min und Abbildung 6-41: Zeitfenster von 10 min).

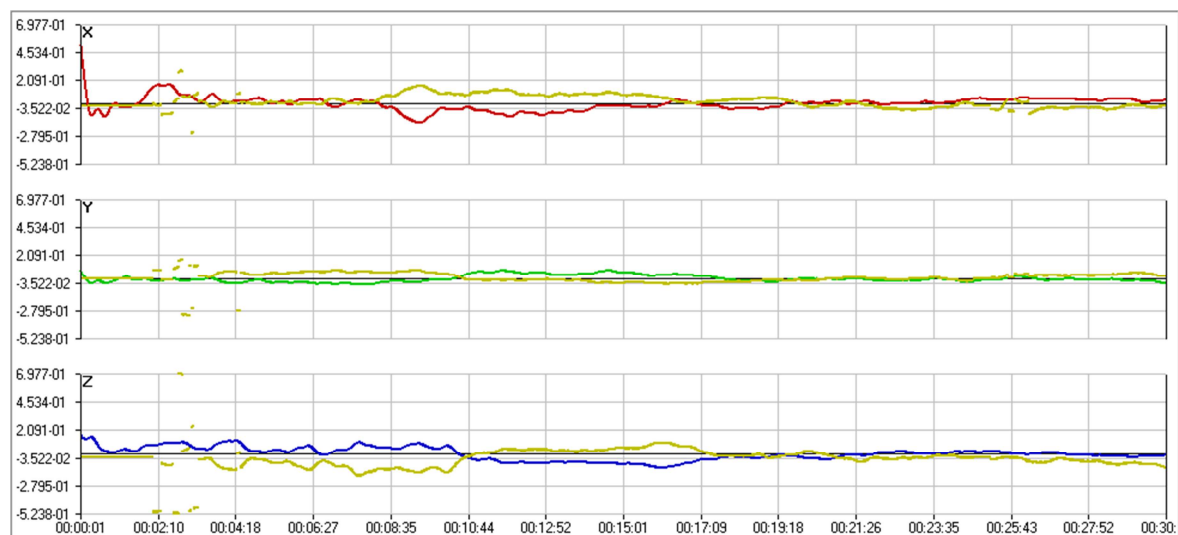


Abbildung 6-40: Konvergenz der Position (X-, Y- und Z-Komponente) unter Verwendung von Galileo E5-Messungen.

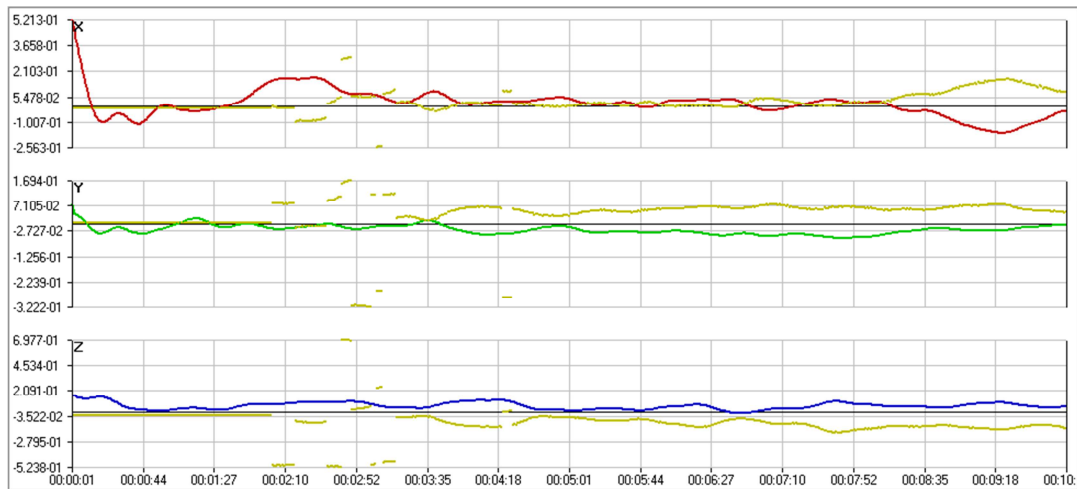


Abbildung 6-41: Konvergenz der Position unter Verwendung von Galileo E5-Messungen; Vergrößerung der Abbildung 6-40 (die ersten 10 Minuten der Beobachtung); die dunkelgelben Punkte zeigen die mehrdeutigkeitsfixierten Einzelperioden-Lösungen

Die Abbildung 6-42 (die ersten 10 Minuten der Prozessierung) illustriert die Schätzung der ionosphärischen Laufzeitverzögerungen eines zufällig gewählten Satelliten sowie die globalen Werte der Mehrdeutigkeits-Diskriminationstests-Ratios und der Mehrdeutigkeits-Erfolgsrate. Es ist offensichtlich, dass die Filterschätzungen der ionosphärischen Laufzeitverzögerungen hier genauer sind als für den Galileo E1-Fall. Darüber hinaus erreicht die theoretische Mehrdeutigkeits-Erfolgsrate nach ca. 5 min ein Niveau sehr nahe 1,0. Die empirische Mehrdeutigkeits-Diskriminationstests-Ratio ist nach ca. 7 Minuten höher als 2,0. Folglich funktioniert die E5-Einfrequenz-Positionierung besser als die E1-Positionierung.

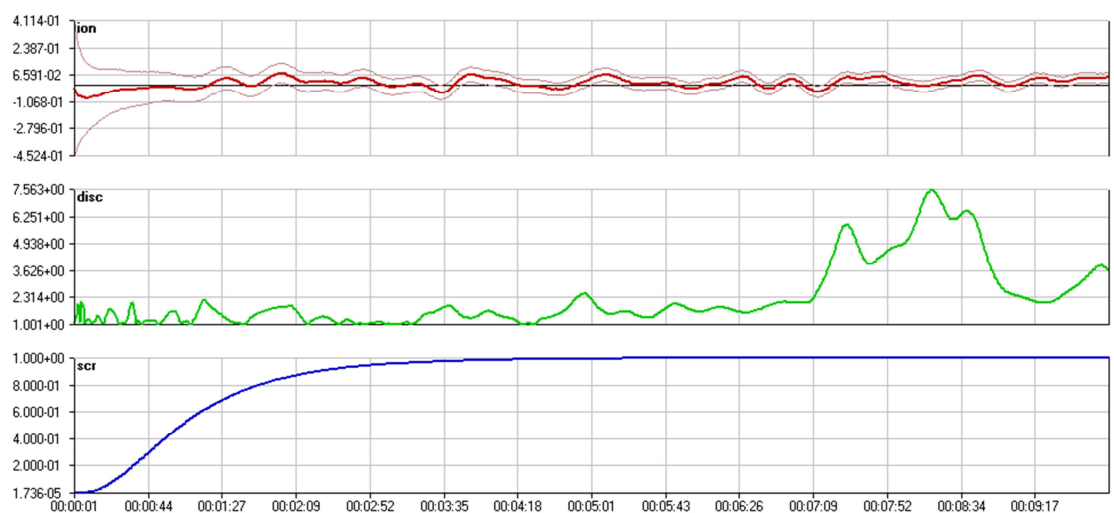


Abbildung 6-42: Ionosphärische Laufzeitverzögerungsschätzungen (E5) („ion“ in Meter) mit Standardabweichungs-Grenzwerten für einen zufällig gewählten Satelliten, Mehrdeutigkeits-Diskriminationstests-Ratios („disc“) und Mehrdeutigkeits-Erfolgsraten („scr“)

Abbildung 6-43 stellt den Zustandsvektor der Mehrdeutigkeitsabschätzungen als Zeitreihe dar. Die rote Linie zeigt die Mehrdeutigkeitsabschätzung des sequentiellen Filters mit den Standardabweichungen (hellrot). Die dunkelgelben horizontalen Linienstücke repräsentieren die ganzzahligen mehrdeutigkeitsfixierten Lösungen, die nicht immer korrekt fixiert sind. Die Fixierung der Mehrdeutigkeit erfolgt für jede Epoche. Es ist

offensichtlich, dass während der ersten 5 Minuten keine stabilen und zuverlässigen Schätzungen der ganzzahligen Mehrdeutigkeiten möglich sind und dass sich die einzelnen Lösungen erst später stabilisieren.

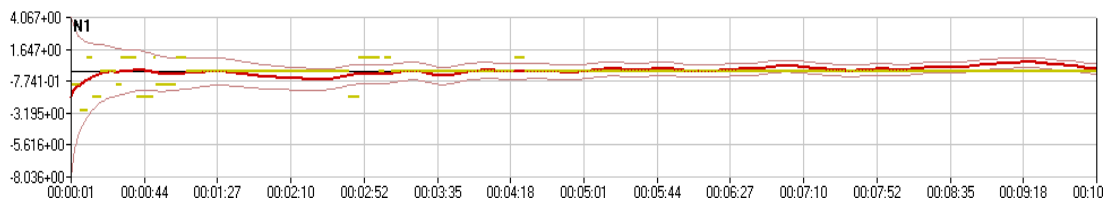


Abbildung 6-43: Zufällig gewählte Mehrdeutigkeitskombination (N1 = simulierte Galileo E5-AltBOC-Trägerphasenmehrdeutigkeit); „Float“-Schätzung in Rot und Fixierungsversuche der Mehrdeutigkeit in Dunkelgelb

Beim Filterungsprozess werden zwei Positionierungslösungen ausgegeben: Der sequentielle Filter schätzt verschiedene Zustände einschließlich der Mehrdeutigkeiten und der atmosphärischen Laufzeitverzögerungen. Zeitgleich, jedoch losgekoppelt vom Filter, wird eine Epoche-zu-Epoche-Positionslösung nach der erfolgreichen formalen Fixierung der Mehrdeutigkeit mittels der Kleinsten-Quadrate-Ausgleichsmethode ermittelt. Üblicherweise wird diese Lösung aus Trägerphasenmessungen berechnet. Die entsprechende Beobachtungsgleichung enthält die ionosphärische Laufzeitverzögerung, die aus den Schätzungen des sequentiellen Filters abgeleitet wird. Aus diesem Grund erscheinen die mehrdeutigkeitsfixierten Positionslösungen nicht mehr als kontinuierliche, horizontale Linien, die mehr oder weniger von der Unveränderlichkeit der Lösung zeugen. Die Variationen der Lösung werden hier (vgl. Abbildung 6-43) durch Restfehler der Filterschätzungen der Ionosphären- (und Troposphären-) Laufzeitverzögerungen induziert. Der Unterschied zum Szenario in Abbildung 6-37 (kurze Basislinie) ist deutlich ersichtlich, da die kurze Basislinien-Konfiguration die atmosphärischen Verzögerungen effektiv eliminiert. Dabei werden, abgesehen von einigen kleineren und mehr oder weniger zufälligen Rauschverhalten, praktisch keine Veränderungen der Zielparаметer verursacht.

Alternativ zur Trägerphasenberechnung kann die parallele Epoche-zu-Epoche-Lösung unter Verwendung der Code-plus-Carrier-Kombination, die die ionosphärische Laufzeitverzögerung eliminiert, berechnet werden. Die entsprechende Zeitreihe wird in Abbildung 6-44 veranschaulicht. Sie führt vor Augen, dass Codestreckenmessungen unter noch größeren Multipath-Einflüssen (Schwingungen der dunkelgelben Linien) leiden als Trägerphasenmessungen. Tatsächlich handelt es sich bei den Multipath-Einflüssen um die hierbei dominierenden Rauscheigenschaften. Dennoch ist die Positionslösung bei Verwendung der CPC zur Eliminierung des Ionosphärenfehlers mit einer Genauigkeit im Subdezimeter-Bereich (mit Standardabweichungen von wenigen Zentimetern) deutlich präziser.

Um ein Gesamtbild vom Einsatz des sequentiellen Filters zu erhalten, wird schließlich ein Blick auf die RCF-Multifrequenz-Positionierung geworfen, d.h. Galileo E1-, E5a- und E5-Daten werden mit dem sequentiellen Filter parallel prozessiert. Multifrequenz-Daten ermöglichen die Nutzung der dispersiven Natur der Ionosphäre zur Beseitigung des durch sie verursachten Fehlers. Allerdings stellen die Trägerphasenmehrdeutigkeiten weiterhin eine gewisse Belastung für den Filter dar. Ihre Bestimmung wird unweigerlich die Konvergenz der Filterparameter verlangsamen, wenn auch nicht in gleichem Ausmaß wie bei Einfrequenz-Daten.

Wieder einmal sind Codestreckenmessungen von entscheidender Bedeutung für den Erhalt hinreichend genauer Mehrdeutigkeiten. Bei der Multifrequenz-Kombination (E1, E5a, E5) sind jedoch nur Galileo E5 AltBOC-Codestreckenmessungen von höchster Präzision.

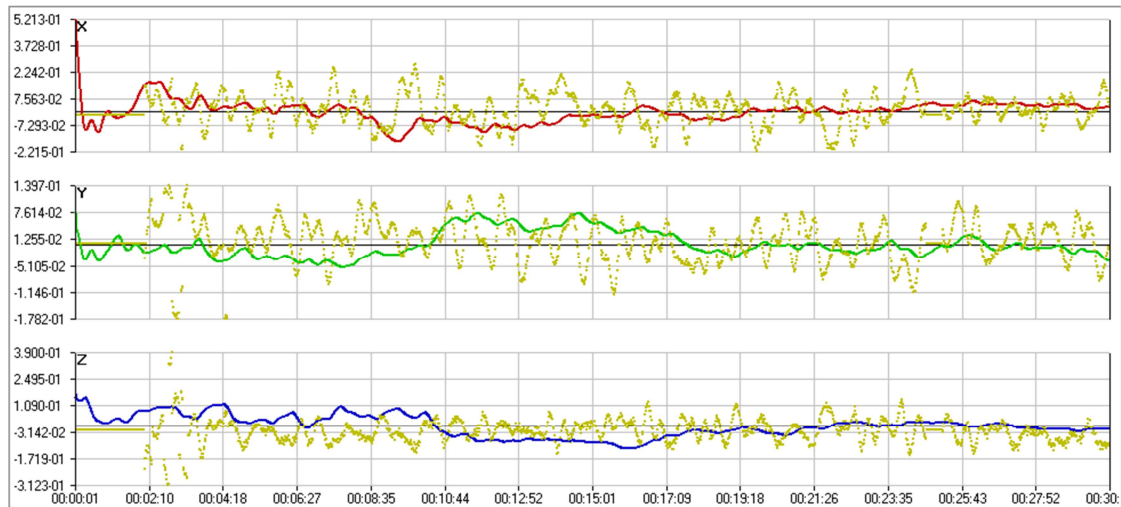


Abbildung 6-44: Konvergenz der Position unter Verwendung von Galileo E5-Messungen; die rote (X) bzw. grüne (Y) bzw. blaue (Z) Linie zeigt die Ausgabe des sequentiellen Filters und die dunkelgelben Linien zeigen die Einzelperioden-Lösungen unter Verwendung von CPC-Messungen (X-, Y- und Z-Komponente)

Abbildung 6-45 verdeutlicht diese Tatsache: Eine stabile und richtige mehrdeutigkeitsfixierte Position wird nach ca. 4 Minuten erreicht. Diese Zeitdauer unterscheidet sich nur geringfügig von derjenigen der RCF-Einfrequenz-Lösung mit Galileo E5-Daten. Obwohl die theoretische Mehrdeutigkeits-Erfolgsrate (siehe Abbildung 6-46) auf eine verhältnismäßig schnelle Auflösung der ganzzahligen Mehrdeutigkeit hindeutet - ein Wert nahe 1,0 ist nach etwa einer halben Minute erreicht -, gibt die empirisch abgeleitete Mehrdeutigkeits-Diskriminationstests-Ratio ein anderes Bild ab: Ein Schwellenwert von 2,0 wird in diesem Beispiel erst nach ca. 12 Minuten überschritten.

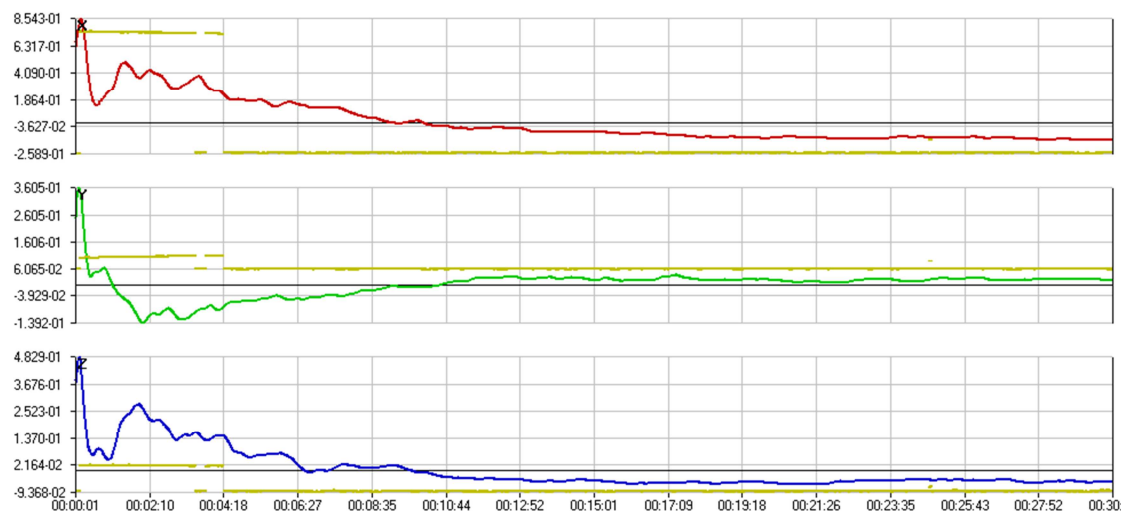


Abbildung 6-45: Konvergenz der Position unter Verwendung von Galileo E1-, E5a- und E5-Messungen

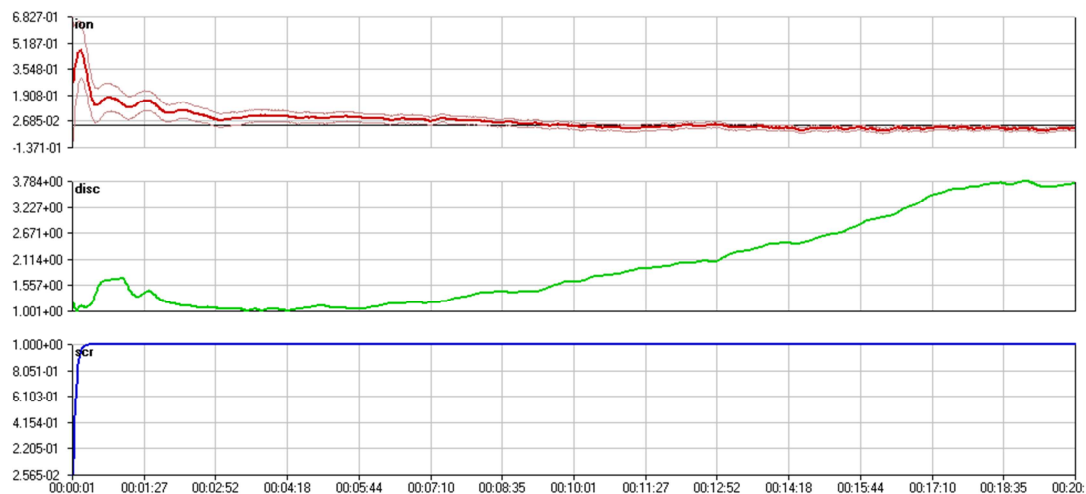


Abbildung 6-46: Ionosphärische Laufzeitverzögerungsschätzungen (E1, E5a, E5) („ion“ in Meter) mit Standardabweichungs-Grenzwerten für einen zufällig gewählten Satelliten, Mehrdeutigkeit-Diskriminationstests-Ratio („disc“) und Mehrdeutigkeits-Erfolgsrate („scr“)

Die Tatsache, dass E1- und E5a-Codestreckenmessungen relativ ungenau sind, ist für diesen langsamen Anstieg verantwortlich - E5-Streckenmessungen alleine können diese Ungenauigkeit nicht kompensieren. Dennoch konvergieren die Schätzungen der ionosphärischen Laufzeitverzögerungen in diesem Beispiel relativ schnell. Damit liefert die Verwendung von Multifrequenz-Daten bei der RCF-Methode kein wesentlich besseres Ergebnis als die Galileo E5-RCF-Lösung (siehe Abbildung 6-47).

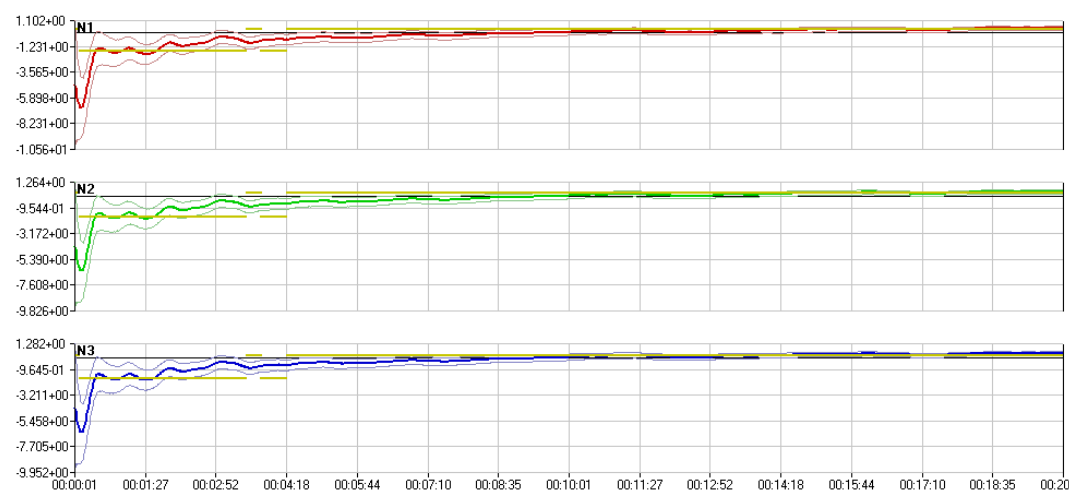


Abbildung 6-47: Zufällig gewählte Mehrdeutigkeitskombination (N1 = simulierte Galileo E1-Trägerphasenmehrdeutigkeit, N2 = simulierte Galileo E5a-Trägerphasenmehrdeutigkeit, N3 = simulierte Galileo E5 AltBOC-Trägerphasenmehrdeutigkeit); „Float“-Schätzung in Rot, Grün und Blau und Fixierungsversuche der Mehrdeutigkeit in Dunkelgelb

In diesem Unterkapitel konnte der Beweis geführt werden, dass die Verwendung der RCF-Methode mit Galileo E5-Daten den Erhalt präziser Positionsergebnisse innerhalb weniger Messperioden (< 5 min) ermöglicht. Damit eröffnet die Einfrequenz-Positionierung mit Galileo E5 für viele Echtzeit- und nahezu Echtzeit-GNSS-Anwendungen neue Perspektiven.

6.6 Anwendungsfall der Einfrequenz-Positionierung: Bestimmung von Positionsänderungen

Die Erdoberfläche und die darauf befindliche Infrastruktur sind ständig in Bewegung (aufgrund von z.B. Gezeiten) und können durch natürliche und unnatürliche Phänomene über einen Zeitraum von wenigen Sekunden bis zu mehreren Jahren Änderungen in ihrer Lage im Bereich von einigen Millimetern bis zu wenigen Metern erfahren. Die Überwachung solcher Verschiebungen oder Verformungen erlaubt es, ihre Amplituden zu analysieren und die Bevölkerung ggf. rechtzeitig vor einer bevorstehenden Gefahr zu warnen. Die GNSS-Technologien gehören derzeit zu den meistverwendeten Sensoren für diese Art von Überwachungsaufgaben. Die Überwachung durch GNSS erfolgt entweder kontinuierlich oder durch wiederholte Messungen in regelmäßigen Zeitabständen. Der Hauptvorteil der Verwendung von GNSS-Sensoren im Vergleich zu herkömmlichen Überwachungssensoren wie z.B. Tachymetern ist u.a., dass GNSS keine Sichtlinien zwischen den Stationen benötigt und die Empfänger automatisiert werden können, mit der Folge, dass keine direkte menschliche Interaktion gebraucht wird. In diesem Unterkapitel wird untersucht, ob die Überwachungstätigkeiten bzgl. der Erdoberfläche auch durch Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung bewerkstelligt werden können und welche Genauigkeitsspannen zu erwarten sind. Die zwei Experimente, die in Abschnitt 4.4.3 (Überwachung von Blockgletschern und Erdbeben) beschrieben wurden, werden zu diesem Untersuchungszweck durchgeführt. Da die Überwachungsanwendungen auf eine Langzeitbeobachtung angelegt sind, kann die CPC-Methode ohne Einschränkungen verwendet werden. Aus Kostengründen erscheint es empfehlenswert, für die Positionsberechnungen mittellange Basislinien zu nutzen. Somit wird jeder sich potentiell bewegende Punkt über ein nur relativ dünn besiedeltes Netz von Referenzstationen bestimmt. Dies dient zusätzlich dem Ziel der Studie, zu beweisen, dass eine präzise Einfrequenz-Positionierung mit Galileo E5-CPC auch mit einem dünn besiedelten Netz machbar ist.

6.6.1 Überwachung von Blockgletschern

Blockgletscher sind permanent gefrorene Schuttmassen, die entlang von Berghängen hinabkriechen. Diese Kriecherscheinungen des Permafrosts wurden in den letzten Jahrzehnten auf der ganzen Welt zum Zweck des Klimawandels intensiv untersucht, (siehe KAUFMANN [1996]). Das hier durchgeführte Experiment basiert auf einer Studie der ETH Zürich auf dem Dirru-Blockgletscher (an der Ostseite des Matertals in der Schweiz), bei dem die Geschwindigkeiten der Oberflächen des Blockgletschers bestimmt wurden, (siehe Abbildung 4-5). Ausgehend von dieser Geschwindigkeitskarte werden simulierte Daten generiert, die die Bewegungen des Blockgletschers über eine Periode von sechs Monaten hinweg repräsentieren. Dafür wird ein virtuelles Netz, bestehend aus fünf über den Blockgletscher verteilten Messstationen (DIR1, DIR2, DIR3, DIR4 und DIR5) eingerichtet. Die zu erwartenden Verschiebungsamplituden der Stationen liegen zwischen 0,1 bis 1,5 m pro Jahr. Die Geschwindigkeitsvektoren (v_x , v_y und v_z) der einzelnen Stationen werden interpoliert, womit ein Überwachungsszenario des Blockgletschers simuliert werden kann. Um die doppelt-differenzierten CPC-Lösungen berechnen zu können, wird die IGS-Station ZIMM (Zimmerwald, 89 km entfernt vom Blockgletscher) als Referenzstation gewählt. Ein wichtiges Kriterium für die Wahl der Referenzstation ist deren Lage außerhalb des Bewegungsbereichs des Gletschers.

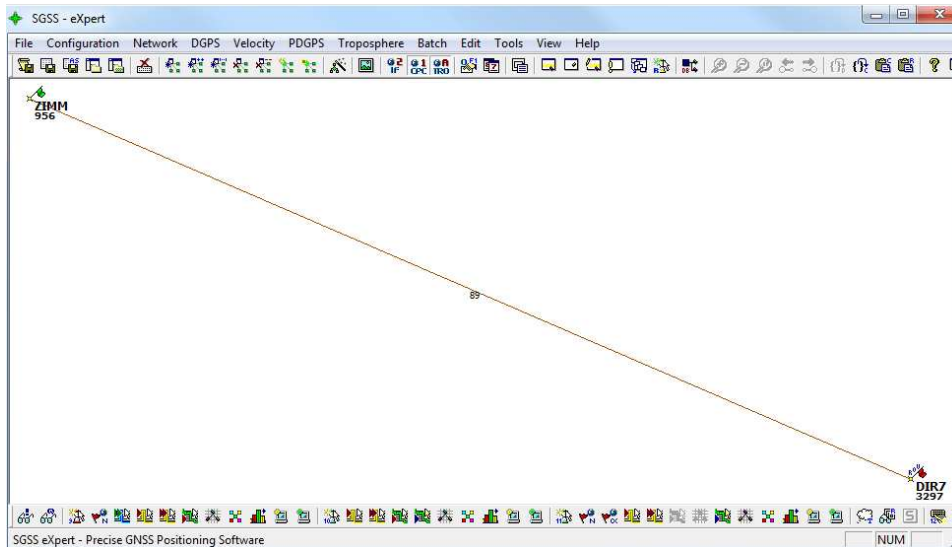


Abbildung 6-48: Basislinie zur Bestimmung der Koordinaten einer Überwachungsstation

Abbildung 6-48 zeigt die Konfiguration zur Berechnung der CPC-Position einer Überwachungsstation mit Hilfe der “eXpert”-Applikation.

Die Bestimmung von Änderungen in der Position einer Station erfordert die Berechnung der Differenz von aufeinanderfolgenden Positionsschätzungen desselben Punktes nach Ablauf einer bestimmten Zeit. Dies stellt gewisse Genauigkeitsanforderungen an die Bestimmungsmethode. Die Anforderungen hängen von der Beobachtungszeit und der Änderungsrate der Position zwischen den zwei Mess-Epochen ab. Für die Zwecke einer genauen Bestimmung der Verschiebungsrates müssen alle Fehlerquellen in Betracht gezogen werden, die zur Verschlechterung der Genauigkeit führen können:

- Die Antennenexzentrizität: Die geometrischen Antennen-Offsets werden direkt aus dem RINEX-Datei-Header (Offsets in Nord-, Ost- und radialer Richtung) übernommen.
- Das Antennenphasenzentrum: Es werden absolute und relative Antennenkalibrierungsdaten verwendet; die entsprechenden Daten können von der National Geodetic Survey Website heruntergeladen werden (URL: <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>).
- Die Stationsgeschwindigkeit: Sie spiegelt hier in erster Linie Bewegungen aufgrund der Plattentektonik wider, die auf der eurasischen Platte 2,5 cm / Jahr betragen und in anderen Regionen noch größer sind. Diese werden über lineare Modelle ausgeglichen (siehe 3.2.6.1).
- Die Gezeiten der festen Erde: Gezeiteneffekte können zu Verschiebungen der Station im Bereich von einigen Zentimetern bis zu mehreren Dezimetern führen. Diese werden durch existierende Modelle korrigiert (siehe 3.2.7).
- Die Gezeiten der Erdpole: Diese haben einen geringeren Einfluss als die Gezeiten der festen Erde und sind von der tatsächlichen Polposition abhängig. Sie werden jedoch bei der Prozessierung korrigiert.
- Die Rotation der Erde: Die Ausrichtung der Erde kann während eines Tages variieren. Diese Variationen können geringfügige Abweichungen der mittleren Erdorientierungsparameter-Daten verursachen.

- Die ozeanischen Auflasten auf den Kontinenten: Sie können zu geringfügigen Verschiebungen (wenige Millimeter bis zu einigen Zentimetern - häufig in Küstenregionen der Erde) führen, die in der Prozessierung der Daten berücksichtigt werden.

Die Prozessierungssoftware „eXpert“ ermöglicht einige Fehlerkorrekturen bzw. -reduzierungen bei der Prozessierung. Die meisten Reduzierungen sind erst erforderlich, wenn die Basislinie länger als 10 km ist.

Für das Beispiel des Dirru-Blockgletschers werden tägliche (Beobachtungszeit = 24h) simulierte Datensätze für die Berechnung der präzisen Einfrequenz-Positionen generiert. Die Positionen der Stationen werden einzeln prozessiert und danach zusammengeführt, um ein Bewegungsprofil des Gletschers zu erstellen. Um Positionsänderungen zu bestimmen, werden die Positionen einer Überwachungsstation (DIR5) nach Ablauf einer bestimmten Zeit immer wieder neu berechnet. Aus der Bewegungskarte der Abbildung 4-5 ist eine Bewegungsrate von ca. 70 cm / Jahr zu entnehmen. Der Start der Überwachung ist auf den GPS DoY 001 festgelegt. Die Koordinaten der Station werden hierfür ermittelt und als Referenzkoordinaten festgesetzt. 60 Tage nach dem Beginn werden die Koordinaten der Station erneut berechnet. Die Daten werden unter Verwendung der CPC-Einfrequenz-Positionierungsmethode für GPS L1 und Galileo E5 prozessiert. In Abbildung 6-49 werden die Ergebnisse aus GPS L1- und Galileo E5-Daten gegenübergestellt.

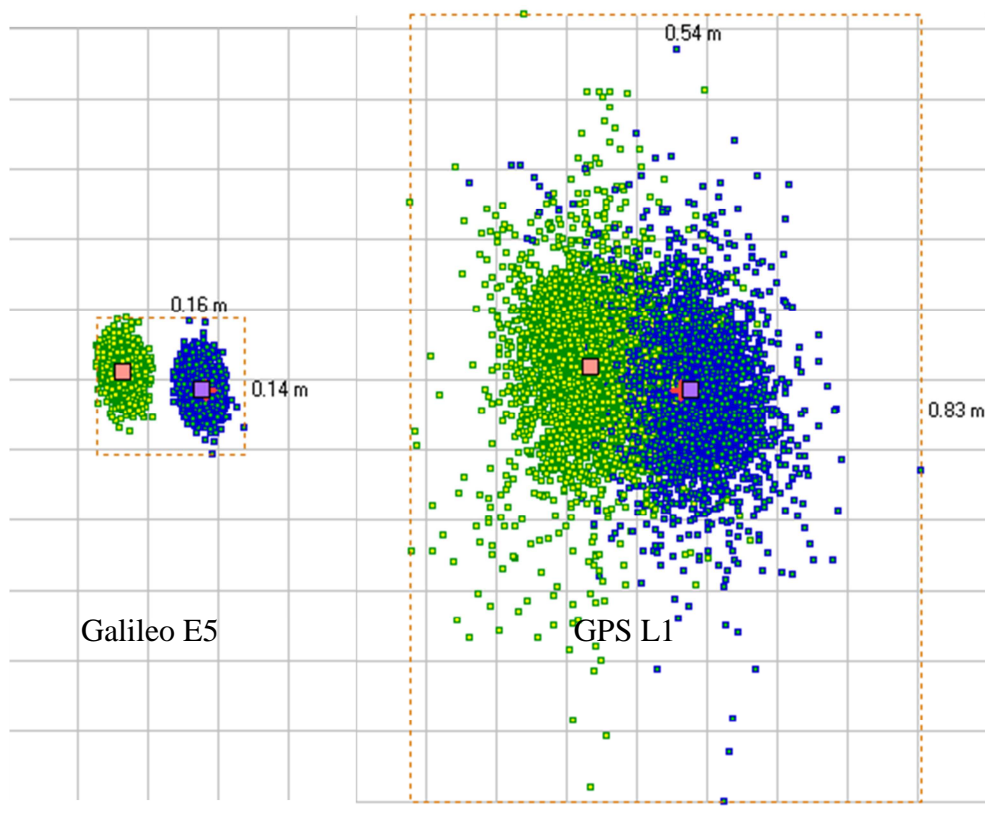


Abbildung 6-49: Ergebnisse des Positionsvergleichs nach 60 Tagen Überwachung; grüne Punkte=Beginn der Überwachung, blaue Punkte= nach 60 Tagen, Roter Kreuz: Wahre Position zum Beginn, Viereckige Punkte: tatsächliche Position während der Messung

Abbildung 6-49 zeichnet ein klares Bild der Bestimmbarkeit von Positionsänderungen der beiden Datensätze. Die erwartete Bewegungsrate nach 60 Tagen beträgt etwa 11 cm. Aufgrund des hohen Rauschniveaus in den GPS L1-Codestreckenmessungen sind die Positionsergebnisse weit gestreut. Die einzelnen Ergebnisse der beiden Zeiträume überlappen sich (blaue und grüne Punkte). Somit kann eine Änderung der Lage der Überwachungsstation nach 60 Tagen nicht festgestellt werden. Die Analyse der Positionsberechnung für jede Messepoche ergibt für GPS L1-CPC-Ergebnisse eine Fehlerellipse von etwa 30 cm. Diese Genauigkeit ist nicht ausreichend, um eine Positionsänderung von ca. 11 cm festzustellen.

Galileo E5-CPC-Ergebnisse erzeugen ein völlig anderes Bild: Hier ist zu erkennen, dass sich die Positionsergebnisse beider Epochen unterscheiden. Dies bedeutet, dass die Station eine Verschiebung erfahren hat. Die statistische Analyse der Ergebnisse ergibt eine Fehlerellipse von ca. 5 cm für die beiden Epochen. Dies reicht prinzipiell aus, um eine Verschiebung von 11 cm nachzuweisen. Die Verschiebung, die bei den Galileo E5-CPC-Ergebnissen angezeigt wird, hat zwar eine kleinere Amplitude (ca. 5 cm) als die reale Verschiebung (11 cm). Trotzdem zeigen die Ergebnisse, dass die Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung in der Lage ist, eine kleine Positionsänderung nach einer kurzen Zeitspanne zu erfassen.

Das gleiche Experiment wird nach 120 Tagen durchgeführt, d.h. die CPC Ergebnisse vom Beginn der Überwachung werden mit denjenigen aus GPS L1- und Galileo E5-Messungen nach 120 Tagen verglichen.

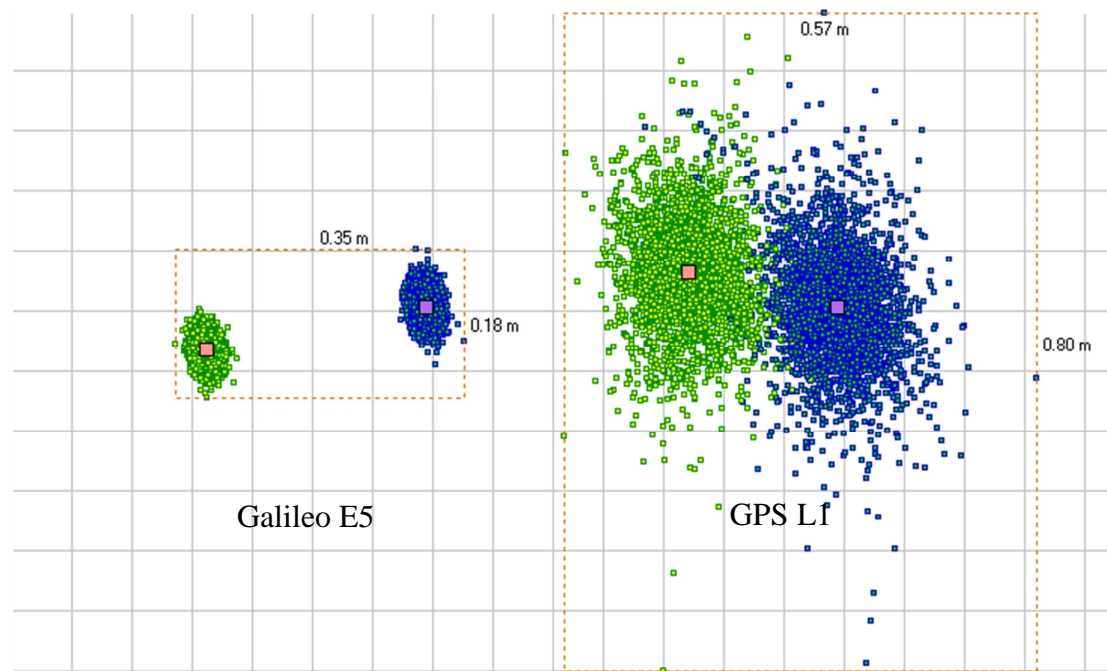


Abbildung 6-50: Ergebnisse des Positionsvergleichs nach 120 Tagen Überwachung; grüne Punkte=Beginn der Überwachung, blaue Punkte= nach 120 Tagen

Interpolationen aus der Bewegungskarte von Abbildung 4-5 ergeben nun eine Bewegungsrate von etwa 25 cm nach 120 Tagen. Wie aus der Abbildung 6-50 entnommen werden kann, kann mit GPS L1-CPC-Messungen keine eindeutige Verschiebung der Überwachungsstationen festgestellt werden. Offensichtlich ist die

Bewegungsrate immer noch zu gering, um sie durch Messungen mit einer Fehlerellipse von ca. 30 cm zu detektieren. Dies erklärt sich wiederum durch das hohe Rauschniveau der GPS L1-Messungen. Ein Bewegungstrend zeichnet sich jedoch auch hier ab.

Die Streuung der Galileo E5-CPC-Ergebnisse ist deutlich besser, so dass die Verschiebung der Station mit ihnen klar bewiesen werden kann.

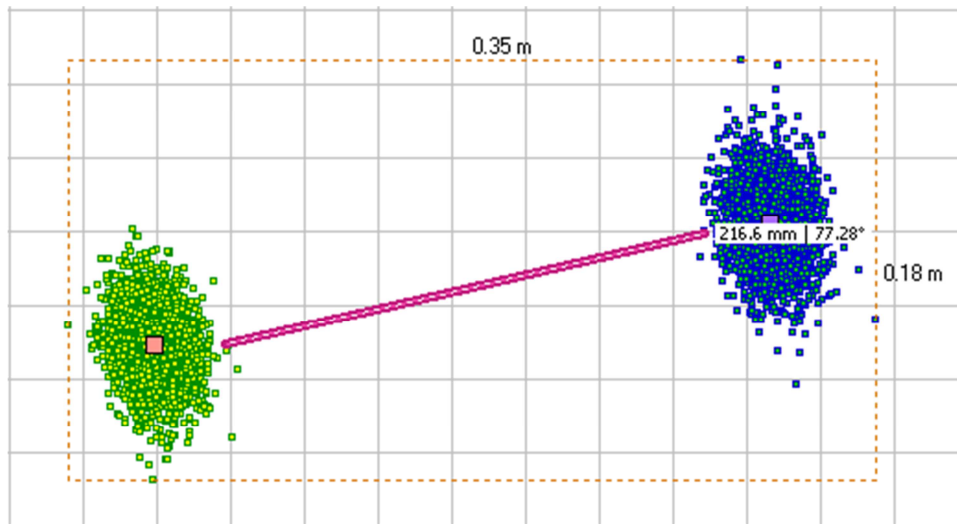


Abbildung 6-51: Feststellung der Bewegungsrate von ca. 21 cm durch Galileo E5-CPC-Messungen

In einer Vergrößerung der Abbildung 6-50 (siehe Abbildung 6-51) wird erkennbar, dass bei den Galileo E5-CPC-Messungen eine Bewegungsrate von ca. 21 cm ermittelt werden kann. Das Ergebnis ist damit sehr nah an der zu erwartenden Bewegungsrate von ca. 25 cm.

Das Experiment zur Bestimmung der Bewegung eines Blockgletschers beweist, dass die Galileo E5-Einfrequenz-Positionierungsmethode ausreichend genaue Positionen liefern kann, um Bewegungen im Subdezimeter- bis Dezimeter-Bereich zu erfassen. Diese Erkenntnis macht einen potentiellen Galileo E5-Einfrequenz-Empfänger zum idealen Werkzeug für Überwachungsaufgaben.

6.6.2 Seismische Punktverschiebung: Erdbeben im März 2011 in Japan

Im März 2011 ereignete sich ein schweres Erdbeben mit einer Stärke von 9 Mw (Magnitude) vor der Küste von Japans, dessen Hypozentrum sich 70 km östlich von der Küste in einer Tiefe von 32 km befand (siehe Abbildung 6-52). Das Beben löste gleichzeitig einen Tsunami an den Pazifik-Küsten aus. Nach Angaben des USGS⁶² wurde das Beben durch eine Überschiebung der Pazifischen Platte und der Nordamerikanischen Platte an deren komplexer Plattengrenze. In diesem Bereich bewegt sich die Pazifische Platte mit einer Geschwindigkeit von durchschnittlich 83 mm pro Jahr westwärts in Richtung der Nordamerikanischen Platte.

⁶² USGS: US Geological Survey: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/recenteqsww/Quakes/usc0001xgp.php#summary>

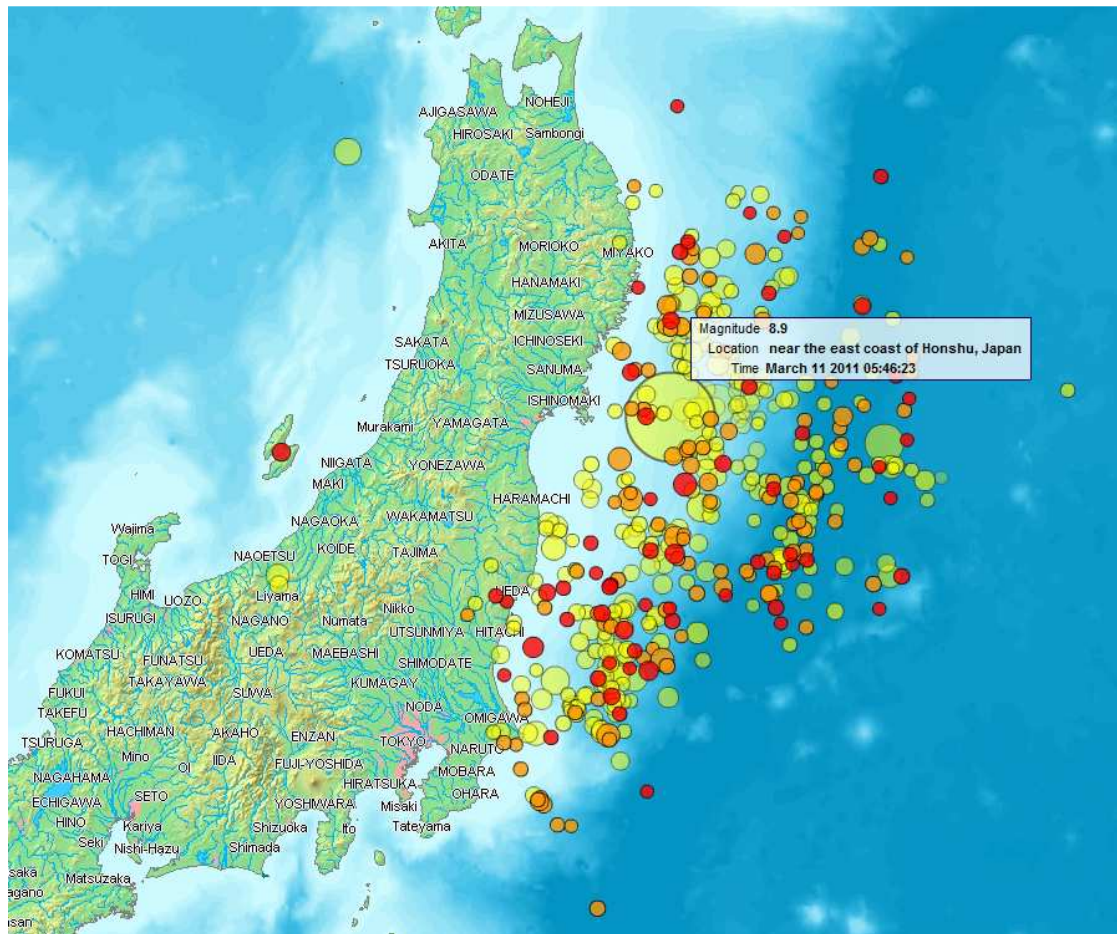


Abbildung 6-52: Karte des Sendai-Erdbebens am 11. März 2011 und seiner Nachbeben bis 14. März 2011; die Größe und Farbe der Kreise sind von der Bebenstärke abhängig. Quelle: <http://www2.demis.nl/quakes/>, letzter Aufruf: 25 Nov. 2012

Verschiedene geophysikalische Dienste haben in Folge des Bebens eine Bewegung des nordöstlichen Teils von Japan berichtet, so dass Japan um mehr als 2,4 m näher an Nordamerika herangerückt ist. Am 6. April 2011 vermeldete die japanische Küstenwache, dass das Beben den Meeresboden in der Nähe des Epizentrums um 24 m verschoben und denjenigen vor der Küste von Miyagi (einer japanischen Präfektur) um 3 m angehoben hat. Einem IGS-Bericht zufolge wanderte die Station Usuda (USUD) aufgrund des Erdbebens um fast 20 cm. Eine Verschiebung dieser Amplitude kann in der Regel durch Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung bestimmt werden, jedoch nicht durch GPS L1 Messungen.

Um dies zu beweisen, werden simulierte GPS L1- und Galileo E5-Daten der IGS-Station USUD im Zusammenhang mit dem Erdbeben generiert. Anhand dieser Daten wird ein Vergleich zwischen den Positionslösungen vor dem Beben und nach dem Beben durchgeführt, um eine Änderung der Stationsposition zu bestimmen. Alle anfälligen Fehlerquellen (Antennenexzentrizität, Antennenphasenzentrum, Stationsgeschwindigkeit etc.) sind in der Simulation entsprechend den Daten der realen Welt einbezogen. Die Abbildung 6-53 zeigt die Konfiguration des Prozessierungsnetzes.

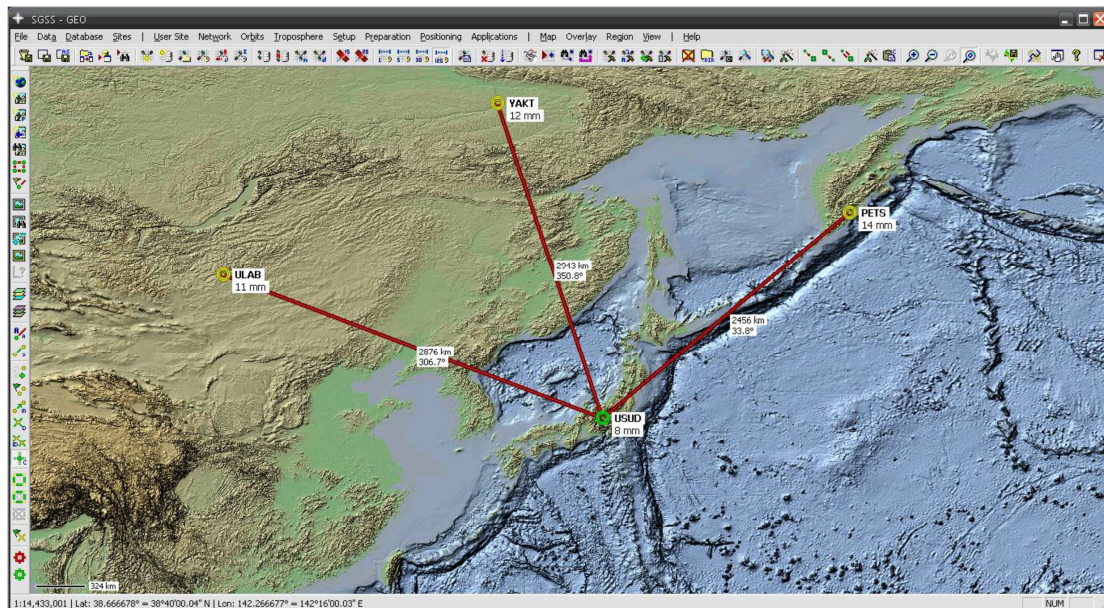


Abbildung 6-53: Konfiguration des Prozessierungsnetzes

Die Richtigkeit der simulierten Daten wurde bereits in Kapitel 5.2 bewiesen. Da es sich jedoch bei einem Erdbeben um eine abrupte Bewegung der Station handelt, soll der Wahrheitsgehalt der simulierten Daten einer nochmaligen Überprüfung unterzogen werden. Dafür werden real gewonnene (über IGS verfügbare) GPS-Beobachtungsdaten der Station USUD vor dem Beben verwendet. Damit werden die CPC-Lösungen von GPS L1-Beobachtungen aus der realen Welt (grüne Punkte) mit denjenigen aus simulierten Daten (blaue Punkte) verglichen (vgl. Abbildung 6-54). In der Tat zeigen die simulierten Daten größere Multipath-induzierte Fehler bei niedrigen Elevationen - diese Werte werden in der Simulation etwas pessimistischer geschätzt - aber insgesamt ähneln sich die Eigenschaften der beiden Datensätze stark.

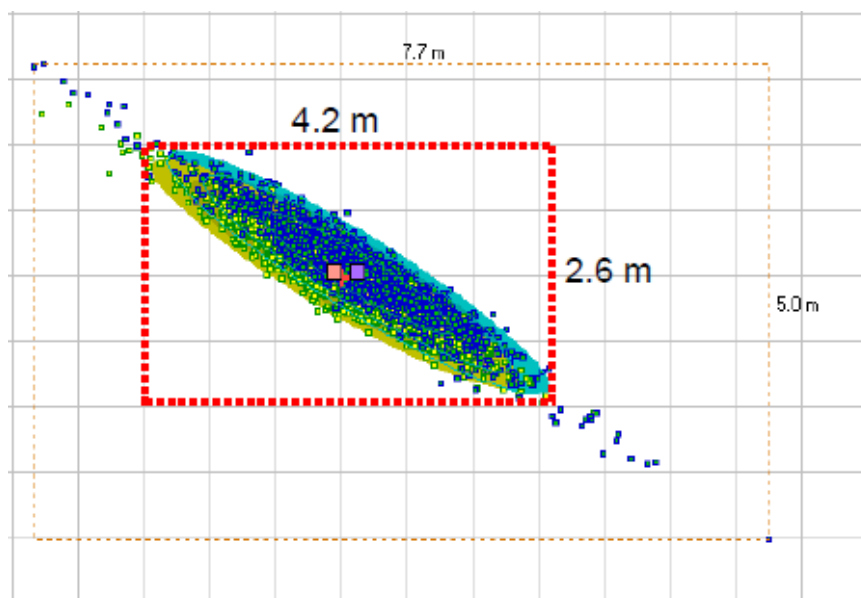


Abbildung 6-54: Vergleich der realen CPC-Lösungen von GPS L1 mit simulierten Daten

Der Vergleich der GPS L1-CPC-Positionslösungen für die Zeit vor und nach dem Erdbeben (siehe Abbildung 6-55 zeigt eine große Überlappung der CPC-Ergebnisse (Die blauen Punkte stellen die Positionslösung vor dem Erdbeben dar und die grünen Punkte diejenige nach dem Erdbeben). Wie vorhin erwähnt, sind die Multipath-induzierten Fehler auf GPS L1 so groß, dass es anhand dessen Positionsergebnisse nicht möglich ist, eine wesentliche Änderung in der Position der Station zu detektieren.

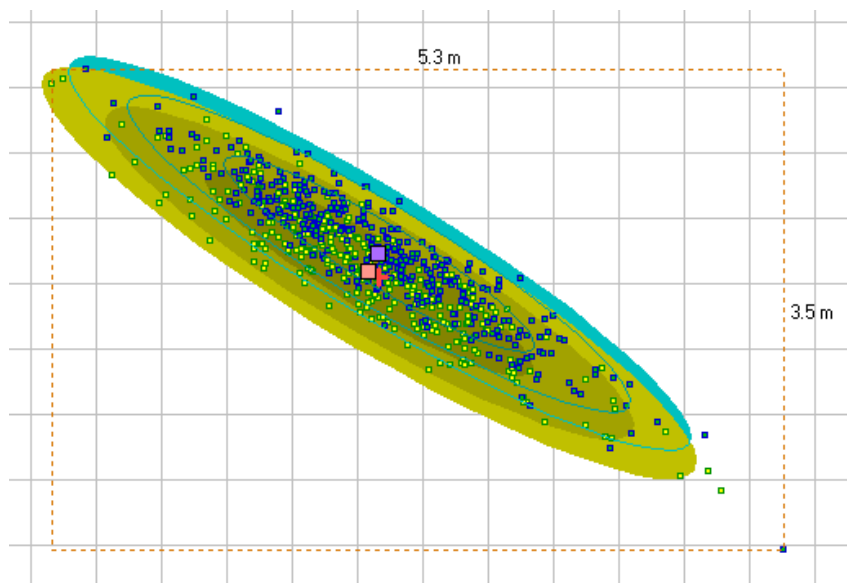


Abbildung 6-55: Vergleich der GPS L1-CPC-Ergebnisse vor und nach dem Erdbeben für die Station USUD

Bei Annahme einer vollständigen FOC-Konstellation zeigt die Galileo E5-CPC-Lösung eine merkliche Verschiebung der Station USUD (siehe Abbildung 6-56). Da die Multipath-induzierten Fehler bei Galileo E5 klein sind, kann die Verschiebung der Station USUD deutlich festgestellt werden.

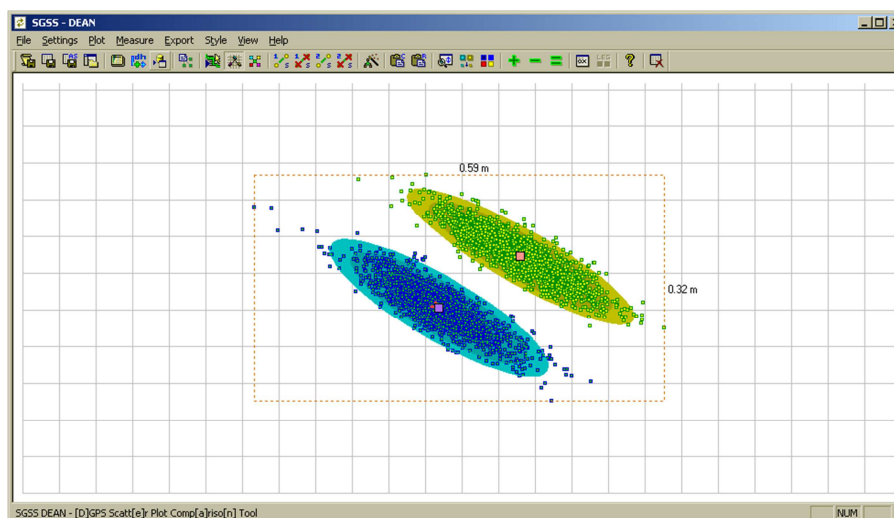


Abbildung 6-56: Vergleich der Galileo E5-CPC-Ergebnisse vor und nach dem Erdbeben für die Station USUD

Anhand dieser beiden Experimente wurden zwei praktische Anwendungsfälle der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung vorgestellt. Hiermit konnte der Beweis geführt werden, dass mit den Galileo E5-CPC-Positionsergebnissen Punktverschiebungen im Bereich einiger Dezimeter bis zu Subdezimetern ohne weiteres detektiert werden können. Somit ist die Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung bei Verwendung der CPC-Methode möglicherweise ein ideales Werkzeug für Überwachungsaktivitäten zur Bestimmung von Positionsänderungen und kann eine gute Alternative zu kostspieligen Mehrfrequenz-Empfängern in diesem Bereich darstellen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit stellt Ansätze zur präzisen Einfrequenz-Positionierung über verschiedene Basislinienlängen (unter 10 km bis 1000 km) unter Verwendung von Galileo E5 AltBOC(15,10)-Beobachtungsdaten vor. Die Hauptintention ist hierbei, das hohe Genauigkeitspotenzial der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung gegenüber anderen GNSS-Signalen hervorzuheben.

Vor dieser Leistungsbewertung werden einige Hintergrundinformationen über die Algorithmen der präzisen Einfrequenz-Positionierung behandelt. Da die vollständige Galileo-Satellitenkonstellation erst im Jahr 2020 fertiggestellt werden soll, gilt es, die Studie anhand simulierter Daten durchzuführen. Die Simulationsalgorithmen werden detailliert dargestellt und es wird sichergestellt, dass die Simulationsdaten so gut wie möglich realen Daten entsprechen.

Schließlich werden einige Verwendungsmöglichkeiten der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung vorgestellt.

7.1 Ergebnisse

Aufgrund seiner Bandbreite (nominal 90 MHz) und der damit verbundenen Vorteile wie dem - im Vergleich zu herkömmlichen Signalen wie GPS L1 - sehr geringen Codemessrauschen sowie geringeren Multipath-Einflüssen auf die Beobachtungen ist Galileo E5 in der Lage, sehr genaue Codestreckenmessungen (im Bereich weniger Zentimeter) zu liefern. So ermöglicht die additive Kombination von Galileo E5-Codestrecken- und Trägerphasenmessungen (die sog. Code-Plus-Carrier-Methode: CPC), die die komplette Eliminierung der ionosphärischen Laufzeitverzögerung erster Ordnung erlaubt, den Erhalt präziser Positionsergebnisse. Die CPC-Ergebnisse der durchgeführten Tests zeigten, dass mit der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung eine 3D-Genauigkeit von wenigen Zentimetern (ca. 2-3 cm) nach einer Konvergenzzeit der Parameter von ca 3-6 h zu erreichen ist. Werden diese Ergebnisse mit den erzielten CPC-Ergebnissen anderer GNSS-Signale wie GPS L1 oder L5 (GPS L1: \approx 10-20 cm; L5: \approx 5-8 cm) verglichen, ist der Mehrwert der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung offenkundig. Die Tabelle 7-1 fasst die CPC-Ergebnisse für verschiedene GNSS-Signale zusammen und vergleicht diese Ergebnisse mit Positionslösungen mittels Trägerphasenberechnungen:

Signal	Nordeuropa (OSLS) 3D RMS [m]	Zentraleuropa (BRUS) 3D RMS [m]	Afrika (OUAG) 3D RMS [m]
CPC-Galileo E5	0,032	0,022	0,036
CPC-Galileo E6	0,075	0,072	0,089
CPC-GPS L1	0,146	0,108	0,205
CPC-GPS L5	0,068	0,057	0,069
CP-Galileo E1+E5	0,002	0,002	0,003
CP-GPS L1+L2	0,004	0,003	0,004

Tabelle 7-1: Zusammenfassung der 3D-Positionsergebnisse; CPC: Code-plus-Carrier, CP: Carrier Phase Processing

Ein Nachteil des CPC-Verfahrens ist die lange Konvergenzzeit der Parameter bis zum Feststehen genauer Koordinaten. Üblicherweise bedarf es eines Minimums von 20 bis

30 min Beobachtungszeit, um Positionsgenauigkeiten im Dezimeter-Bereich zu erzielen. Für Koordinatengenauigkeiten im Bereich weniger Zentimeter ist sogar eine Beobachtungszeit von 3-6 h erforderlich. Dies liegt an der Präsenz von Mehrdeutigkeitsparametern in den gebildeten CPC-Beobachtungsgrößen. Die Fixierung der Mehrdeutigkeitsparameter durch Einsatz geeigneter Methoden wie der LAMBDA-Methode erlaubt es, die Konvergenzzeit der Parameter lediglich um ca. 20 min zu verkürzen, wobei die Positionsgenauigkeit im Bereich weniger Zentimeter liegt.

Erwartungsgemäß zeigten weitere Tests, dass die Genauigkeit der Trägerphasenprozessierung (im Millimeter-Bereich) diejenige der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung um den Faktor 5 bis 10 übertrifft. Jedoch erfordern derartige Prozessierungen den Einsatz kostspieliger Multifrequenz-Empfänger, gleichzeitig ist eine Millimeter-Genauigkeit bei präzisen GNSS-Anwendungen auch nicht immer erforderlich. Folglich kann die Einfrequenz-Positionierung unter Verwendung von Galileo E5 die Nische zwischen der Trägerphasenprozessierung mit einer Millimeter-Genauigkeit und der herkömmlichen Einfrequenz-Positionierung mit einer Submeter- bis Dezimeter-Genauigkeit einnehmen.

Neben der klassischen CPC-Methode wurde eine sog. „Rapid Convergence Filter (RCF)“-Methode implementiert, die einen Kalman Filter verwendet, um die Positionsparameter schneller schätzen zu können. Dieser Ansatz verarbeitet gleichzeitig Code- und Trägerphasenmessungen, versucht für jede Epoche die Mehrdeutigkeit zu lösen und schließlich die mehrdeutigkeitsfixierte Einzelepochen-Positionslösung zu ermitteln. Beim Einsatz doppelt differenzierter Messgrößen über kurze Basislinien, die eine sehr effiziente Eindämmung atmosphärischer Verzögerungsfehler bewirkt, konnten die Mehrdeutigkeiten innerhalb weniger Sekunden fixiert werden und es resultierten Positionsgenauigkeiten im Subdezimeter-Bereich. Diese Ergebnisse sind zweifellos auf die hohe Genauigkeit der Galileo E5-Codemessungen zurückzuführen, sie verschlechtern sich jedoch unter starken Multipath-Einflüssen. Zudem erhöht sich die Konvergenzzeit signifikant, je länger die Basislinie wird, da die atmosphärischen Filterzustände ausreichend offen sein müssen, um die Laufzeitverzögerungen zu schätzen. Hierbei kann es sich bei der Einfrequenz-Positionierung um einen rechenaufwändigen Prozess handeln und die Positionsgenauigkeit erreicht unter diesen Umständen nur den Dezimeter-Bereich.

Aufgrund der relativ langen Konvergenzzeit und der erreichbaren Genauigkeit scheinen Einfrequenz-Positionierungsansätze am besten für Überwachungsaktivitäten geeignet zu sein, da bei diesen GNSS-Anwendungen die Positionsergebnisse nicht unbedingt in Echtzeit geliefert werden müssen. Beispielhaft wurden zwei Anwendungen (Detektion von Blockgletscher-Bewegungen und Punktverschiebung nach einem Erdbeben) untersucht, um die Fähigkeiten der Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung unter Beweis zu stellen. Diese Experimente zeigten, dass die Galileo CPC-Positionsergebnisse in der Lage sind, Positionsänderungen im Bereich weniger Dezimeter bis zu Subdezimetern festzustellen.

7.2 Einschränkungen und Ausblick

Die Galileo-Positionsberechnungen wurden unter Annahme einer vollständigen „Walker 27/3/1“-Satellitenkonstellation durchgeführt, die voraussichtlich erst im Jahr

2020 betriebsbereit sein wird. Ausgehend vom ersten IOV (In-Orbit Validation)-Satelliten im Oktober 2011 wird bis 2015 eine IOC (Initial Operational Capabilities)-Konstellation von rund 18 Satelliten erwartet. Ein Test mit einer solchen reduzierten Konstellation ergab, dass eine präzise Positionierung mit einer spärlichen Anzahl von sichtbaren Satelliten (im Durchschnitt vier) nicht realisierbar ist. Daher galt es zu untersuchen, ob kombinierte Lösungen von Galileo E5 und GPS L5, das die gleiche Frequenz wie das Subträgersignal E5a hat, eine Alternative für diese Übergangszeit bieten könnten. Die Einfrequenz-Positionsergebnisse aus dieser Kombination überzeugten jedoch nicht, da die Genauigkeit von GPS L5-Codemessungen - obwohl sie besser abschneidet als mit GPS L1 - nicht mit derjenigen von Galileo E5-Codemessungen konkurrieren kann.

Eine vielversprechende Alternative für die Zukunft der Einfrequenz-Positionierung könnte jedoch die Kombination von Galileo- und COMPASS/BeiDou-Messungen sein. Das COMPASS B2-Signal ähnelt Galileo E5 in fast sämtlichen Eigenschaften. Aus diesem Grund würde eine Kombination der beiden Signale die Verdopplung der Satellitenverfügbarkeit bedeuten. So könnte durch die Kombination von Galileo E5- und COMPASS B2-Messungen eine schnelle Konvergenz der Positionsparameter bewirkt und die CPC-Ergebnisse um den Faktor 2 verbessert werden.

7.3 Schlussbemerkungen

Diese Arbeit veranschaulichte, dass die Entstehung neuer Satellitennavigations-Systeme eine Vielzahl interessanter Perspektiven für die präzise Einfrequenz-Positionierung birgt. Insbesondere die Nutzung der Potenziale des Galileo E5 AltBOC(15,10)-Breitband-Signals wird es aufgrund von dessen revolutionären Eigenschaften (v.a. weniger Codemessrauschen, geringere Multipath-Einflüsse) ermöglichen, Positionsergebnisse im Bereich weniger Zentimeter zu erhalten. Analysen von Daten der ersten IOV-Satelliten konnten die meisten Annahmen über das Galileo E5-Signal bestätigen. Ein Galileo-Einfrequenz-Empfänger wird aller Wahrscheinlichkeit nach maßgeblich preiswerter (mindestens ca. ein Drittel) ausfallen als die herkömmlichen Multifrequenz-Empfänger. Dennoch kann die Galileo E5-Einfrequenz-Positionierung aufgrund ihrer eingeschränkten Genauigkeit im Zentimeter-Bereich die herkömmliche präzise Trägerphasen-Positionierung mit Multifrequenz-Empfängern nicht ersetzen, sondern soll lediglich die Lücke zwischen präziser Positionsbestimmung (im Millimeter-Bereich) und Standard-Einfrequenz-Positionsbestimmung (im Submeter- bzw. Dezimeter-Bereich) schließen. In der Zukunft wird der Fokus dieses Forschungsgebiets auf der Validierung der Galileo E5-Positionsergebnisse mit realen Daten und der Entwicklung eines einsatzfähigen Galileo E5-Einfrequenz-Empfängers liegen.

8 Referenzen

ASKNE J., NORDIUS H. [1987]: *Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data*; Radio Science, Volume 22, No. 3, pp. 379-386, May/June 1987.

ANDERSON D., FULLER-ROWELL T. [1999]: *The Ionosphere Band 55*; Space Environment Center, 1999.

AVILA-RODRIGUEZ J.A., HEIN G.W., IRSIGLER M., T. PANY [2004]: *Combined Galileo/GPS Frequency and Signal Performance Analysis*; Proceedings of ION GNSS 2004, 21.-24. September 2004, Long Beach, CA, S. 632-649.

BASSIRI S., HAJJ G.A. [1993]: *Higher-order ionospheric effects on the global positioning system observables and means of modeling them*; Manuscripta Geodaetica 18:280–289.

BAUER M. [1994]: *Meßtechniken und Auswerteverfahren*; VDV-Schriftenreihe Band 13(Vermessungspraxis mit GPS); Verlag Chmielorz. Wiesbaden.

BAUER M. [2003]: *Vermessung und Ortung mit Satelliten – GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme*; 5. Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Huthig GmbH & Co. KG, Heidelberg, 2003; ISBN 3-87907-360-0.

BAUERSIMA I. [1983]: *NAVSTAR/Global Positioning System (GPS)*; Mitteilungen der Satellitenbeobachtungsstation Zimmerwald, No. 10Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland (1983).

BOEDECKER G. [2002]: *Das Erdschwerefeld – Vermessen mit dem Flugzeug*; Bayerische Kommission für die Internationale Erdmessung, 25.9.2002.

BONA P. [2000]: *Precision, cross correlation, and time correlation of GPS phase and code observations*; GPS Solution 4(2):3–13.

EISSFELLER B., IRSIGLER M., AVILA-RODRIGUEZ J.A., SCHÜLER E., SCHÜLER T. [2007a]: *Das europäische Satellitennavigationssystem GALILEO – Entwicklungsstand*; Allgemeine Vermessungsnachrichten AVN, 2/2007, S. 42-55, Februar 2007, Wisner-Verlag, Heidelberg.

EISSFELLER B., AMERES G., KROPP V., SAMORA D. [2007b]: *Performance of GPS, GLONASS and Galileo*; Beitrag zur 51. Photogrammetrischen Woche, 3-7 September 2007, Stuttgart.

ERKER S., FURTHNER J., MEURER M. [2011]: *L5 –The new GPS Signal*; IAIN 2009, 27.-30.10.2009 Stockholm, Sweden.

DAI Z., KNEDLIK S., LÖFFELD O. [2009]: *Instantaneous Triple-Frequency GPS Cycle-Slip Detection and Repair*; International Journal of Navigation and Observation VOLUME 2009 (2009), ARTICLE ID 407231, 15 PAGES DOI:10.1155/2009/407231.

DE JONGE P., TIBERIUS CH. [1996]: *The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects*; LGR-series, Publications of the Delft Geodetic Computing Centre, No. 12, TU Delft, August 1996.

DELALOYE R., STROZZI T., LAMBIEL C., PERRU-CHOUDE E., RAETZO H. [2007]: *Landslide-like development of rockglaciers detected with ERS-1/2 SAR interferometry*; Proceedings of the FRINGE 2007 Workshop, Frascati, Italy, 26–30 November 2007.

ESA: <http://www.esa.int/esaNA/galileo.html>; letzter Aufruf 01.12.12.

EULER, H.-J., LANDAU H. [1992]: *Fast Ambiguity Resolution On-The-Fly for Real-Time Applications*; Paper presented at the 60th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Columbus, Ohio, USA, March 1992.

FARAH, A.M.A.; [2008]: *Comparison of GPS/Galileo single frequency ionospheric models with vertical TEC Maps*; Journal of Artificial Satellites, vol. 43, no.2, 2008.

FREI E., BEUTLER G. [1990B]: *Rapid static positioning based on the fast ambiguity resolution approach "FARA": theory and first results*; manuscript geodaetica (1990) 15:325-356.

FUHRMAN T., KNÖPFLER A., LUO X., MAYER M. [2010]: *Zur GNSS-basierten Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfgehalt mittels PPP*; Schriftenreihe des Studienganges Geodäsie und Geoinformatik 2010,2.

GALILEO [2004a]: *GALILEO Signal Baseline*; Standardisation Document of Navigation Systems Panel (NSP), St. Petersburg, Russland, 25. Mai – 4. Juni 2004; WWW:<http://www.galileoju.com/doc/Navigation%20System%20Panel%20NSP%20Galileo%20Signal%20Baseline.pdf>; letzter Aufruf 12.12.2012.

GALILEO [2004b]: *GALILEO Signals: RF Characteristics*; Standardization Document of Navigation Systems Panel (NSP), Montreal, Canada, 12.-22. October 2004;<http://www.galileoju.com/doc/Navigation%20System%20Panel%20NSP%20Galileo%20Signals%20RF%20Characteristics.pdf>; letzter Aufruf 12.12.2012.

Galileo Open Service, Signal In Space Interface Control Document (OS SIS ICD) Draft0; <http://www.galileoic.org/la/files/Galileo%20OS%20SIS%20ICD%20230506.pdf>; letzter Aufruf 12.12.2012.

GAO G.X., DATTA-BARUA S., WALTER T., ENGE P. [2007]: *Ionosphere Effects for Wideband GNSS Signals*; ION Annual Meeting 2007, Cambridge, Massachusetts, April 2007.

GOAD C. [1992]: *Robust Techniques for Determining GPS Phase Ambiguities*; Proceedings of the 6th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Columbus 1992, Vol.I.

GPS WORLD [2008]: *Galileo, COMPASS on collision course*; April 2008 p.27.

GRELIER T., DANTEPAL J., DELATOUR A., GHION A., RIES L. [2007]: *Initial Observations and Analysis of COMPAS MEO Satellite Signals*; Inside GNSS May/June 2007, Gibbons Media & Research LLC.

GUCANG C. [2011]: *Development of BeiDou Navigation Satellite System*; Presentation at the Munich Satellite Navigation Summit 2011, Munich, Germany.

HANSEN [1998]: *Atmospheric Heterogeneities in ERS Tandem SAR Interferometry, Chapter 2*; DEOS Report No. 98.1, S. 8-24, Delft University Press.

HOFFMANN-WELLENHOF B., LICHTENEGGER H., COLLINS J. [1993]: *GPS - Theory and Practice*, 2nd Edition, Springer-Verlag Wien, New York, ISBN 3-211-82364-6.

HOLLMANN R. [2000]: *Untersuchung von GPS-Beobachtungen für kleinräumige geodätische Netze*; Dissertationschrift, Schriftenreihe des Studienganges Geodäsie und Geoinformation, Heft 69, Universität der Bundeswehr München.

HOPFIELD H. [1969]: *Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data*; JGR 74, No. 18, August 20, 1969.

HOPFIELD H. [1969]: *Tropospheric effect on electromagnetically measured range: prediction from surface weather data*; Radio Science, 6, No. 3, 357-367, 1971.

IFADIS I. [1986]: *The Atmospheric Delay of Radio Waves: Modeling the Elevation Dependence on a Global Scale*; Technical Report No. 38L, School of Electrical and Computer Engineering, Chalmers University of Göteborg, Schweden, 1986.

IERS, [1989]: *IERS Standards (1989), IERS Technical Note 3*; (ed. D.D. McCarthy).

IERS, [1996]: *IERS Conventions (1996), IERS Technical Note 21*; (ed. D.D. McCarthy).

IRSIGLER, M., HEIN, W.H., EISSFELLER, B., SCHMITZ-PEIFFER, A., KAISER, M., HORNBOSTEL, A., HARTL, P. [2002]: *Aspect of C-Band Satellite Navigation-Signal Propagation and Satellite Signal Tracking*; Proceedings of ION GPS-2002, Oregon, Portland, September 24-27, 2002.

IRSIGLER, M [2008]: *Multipath propagation, mitigation and monitoring in the light of Galileo and the modernized GPS*; Dissertation, Faculty of Aerospace Engineering, University FAF Munich, Neubiberg, Germany.

ISSLER J-L., RIES L., BOURGEADE J-M., LESTARQUIT L., MACABIAU C. [2004]: *Probabilistic approach of frequency diversity as interferencemitigation means*; Proceedings of ION GNSS, 17th international technical meeting of the satellite division, 21–24 September 2004, Long Beach, CA, USA, pp. 2136–2145.

KAUFMAN V. [1996]: *Geomorphometric Monitoring of Active Rock Glaciers in the Austrian Alps*; Paper presented at the 4th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, Karlstad - Kiruna - Tromsø, August 19-29, 1996.

KASHANI I., WIELGOSZ P., DOROTHA A., BRZEZINSKAI G. [2004]: *On the reliability of the VCV Matrix: A case study based on GAMIT and Bernese GPS Software*; DOI 10.1007/s10291-004-0103-9 GPS Solutions (2004) 8:193–199.

KLOBUCHAR, J.A. [1996]: *Ionospheric Effects on GPS*; in: SPILKER, J.J., B.W. PARKINSON: *GPS Theory and Applications*, Vol. I, eds, Amer. Inst. of Astronautics and Aeronautics, Washington, pp. 485-515(1996).

KOUBA J; HÉROUX P. [2001]: *GPS Precise Point Positioning using IGS Orbit Products*; <ftp://ftp.glonass-ianc.rsa.ru/REPORTS/OLD/NRCAN/final.pdf>; letzter Aufruf 09.12.2012.

KRUEGER E., SCHÜLER T., HEIN G.W., MARTELLUCCI A., BLARZINO G. [2004]: *Galileo Tropospheric Correction Approaches developed within GSTB-VI*; GNSS 2004 – European Navigation Conference, 17.-19, Mai 2004, Rotterdam, Niederlande.

KRÜGER E.; SCHÜLER T.; ARBESSER-RASTBURG B. [2005]: *The Standard Tropospheric Correction Model for the European Satellite Navigation System Galileo*; XXVIIIth General Assembly of International Union of Radio Science (URSI), 23-29 October 2005, New Delhi, India.

LAMBIEL C., DELALOYE R., [2004]: *Contribution of real-time kinematic GPS in the study of creeping mountain permafrost: examples from the Western Swiss Alps*; Perm. Perigl. Proc. Vol. 15/3, 229-241.

LACHAPELLE G.; CANNON M.E.; O'KEEFE K.; ALVES P [2002]: *How will Galileo Improve Positioning Performance*; GPS World, pp.38-48, September 2003.

LANDAU H [1988]: *Nutzung des Global Positioning Systems in Geodäsie und Geodynamik: Modellbildung, Software-Entwicklung und Analyse*; Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München.

LAU L., MOK E. [1999]: *Improvement of GPS Relative Positioning Accuracy by Using SNR*; Journal of Surveying Engineering, ACSE, pp.185-202, November 1999.

LEICK A. [2004]: *GPS-Satellite Surveying*; ISBN-10: 0471059307.

LESTARQUIT L., ISSLER J-L. [2008]: *Altboc for dummies or everything you always wanted to know about altbOC*; In Proceedings of the ION GNSS 2008, Savannah, GA, 16-19 September 2008.

LESTARQUIT L., VEIGNEAU W., ISSLER J-L., RIES L., LEGRAND F. [2003]: *Tracking and multipath performance of assessments of boc signals using a bit-level signal processing simulator*; In ION GPS/GNSS 2003, Portland, OR, 9-12 September 2003.

LÜCK T., WINKEL J., BODENBACH M. [2009]: *A Complex Channel Structure for Generic GNSS Signal Tracking*, In Proceeding of the ION GNSS 2009 Savannah, Georgia, September 2009.

LÜCK T. [2011]: *SX5 Receiver Adaptation Report*; SX5-13-GSAi-RAR, SX5 project 2010-2012.

MADAR G.L. [1999]: *GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey*; GPS Solutions, vol., No. 1, Summer 1999, Wiley & Sons.

MAYER M., KNÖPFLER A., NUCKELT A., HECK, B., SCHMITT G. [2007]: *Untersuchungen zum Einfluss von Antennenkalibrierwerten auf die Prozessierung regionaler GPS-Netze*; Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik; 2007,1, ISSN: 1612-9733.

MCHOY S. SILCOCK D. [2011]: *Single Frequency Ionosphere-free Precise Point Positioning: A Cross-correlation Problem?*; Journal of Geodetic Science, vol. 1, no. 4, pp. 314-323 (2011).

MISRA P., ENGE P. [2001]: *Global Positioning System – Signals, Measurements and Performance*; Ganga-Jamuna Press 2001.

MONTENBRUCK O., YOON Y., GILL E., GARCIA-FERNANDEZ M. [2006]: *Precise orbit determination for the TerraSAR-X mission*; Proceedings of ISTS 2006-d-58, 19th international symposium on space flight dynamics, 4–11 June 2006, Kanazawa, Japan.

MORENO R., SUARD N., LESTARQUIT L. [1999]: *Ionospheric delay using only L1: validation and application to GPS receiver calibration and to inter-frequency biases estimation*; Proceedings of the 1999 national technical meeting of the Institute of Navigation, January 25–27, 1999, Catamaran Resort Hotel, San Diego, CA, USA, pp 119–125.

MUELLERSCHOEN R.J., IJIMA B., MEYER R., BAR-SEVER Y, ACCAD E. [2004]: *Real-time point-positioning performance evaluation of single frequency receivers using NASA's global differential GPS System*; Proceedings of ION GNSS 2004, 17th international technical meeting of the satellite division, 21–24 September 2004, Long Beach, California, USA, pp 1872–1880.

NIEMEIER W. [2008]: *Ausgleichsrechnung (Gruyter - de Gruyter Lehrbücher), Statistische Auswertemethoden*; 2. Vorlage (de Gruyter Lehrbuch).

NORMAK P-L., AKOS D., XIE G. PULLEN S., LUO M., ENGE P. [2002]: *The Integrity Monitor Testbed and Multipath Limiting Antenna Test Results*; <http://waas.stanford.edu/~www/papers/gps/PDF/NormarkIONGPS02.pdf>; letzter Aufruf 01.12.12.

ODIJK D. [2002]: *Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delays*; Dissertation, Department of Mathematical Geodesy and Positioning, University of Delft, Netherland, 2002; ISBN 90-80147-2-7.

PARKINSON, B. W., SPILKER, J. J. (1996): *Global Positioning System: Theory and applications*; Volume I, Progress in Astronautics and Aeronautics volumes 163 American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Washington, 1996.

PETOVELLO M., SIMPSON J. [2009]: *GNSS Solution: Spaceborne GNSS Receivers*; Inside GNSS November/December 2009, Gibbons Media & Research LLC.

POUTANEN M., JOKELA J., OLLIKAINEN M., KOIVULA H., BILKER M., VIRTANEN H. [2005]: *Scale variation of GPS time series*; A Window on the Future of Geodesy; International Association of Geodesy Symposia Volume 128, 2005, pp. 15-20.

PIRIZ, R., B. MARTIN-PEIRO, M. ROMAY-MERINO [2005]: *The Galileo Constellation Design: A Systematic Approach*; Proceedings of ION GNSS 2005, 13.-16. September 2005, Long Beach, CA, S. 1296-1306.

PRATT A.R., OWEN J.I.R., HEIN G.W., AVILA-RODRIGUEZ J.A. [2006]: *Tracking Complex Modulation Waveforms – How to Avoid Receiver Bias*; Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation IEEE/ION PLANS 2006, 24.-27. April 2006, San Diego, CA, S. 853-864.

PRESS W.H., TEUKOLSKY S.A., VETTERLING W.T., FLANNERY B.P. [1992]: *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*; Second Edition, Cambridge University Press, 1992; ISBN 0-521-43108-5.

REMONDI B.W. [1984]: *Using the Global Positioning System (GPS) Phase Observable for Relative Geodesy: Modeling, Processing and Results*; Dissertation, Center for Space Research, University of Texas at Austin, 1984; NOAA Reprint.

RIZOS C. [1996]: *Principles and Practice of GPS Surveying*; Monograph 17, School of Surveying and Spatial Information Systems, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 1996, pp. 500.

RIZOS C. [1999]: *Quality issues in real-time GPS positioning*; Final Report of the IAG SSG 1.154, 1999, (http://www.gmat.unsw.edu.au/ssg_RTQC/ssg_rtqc.pdf).

ROTHACHER M, MERVART L. [1996]: *Documentation of the Bernese GPS Software Version 4.0*; User Guide, Astronomical Institute, University of Berne, Sidlerstrasse 5, CH-3012 Berne, Switzerland, September 1996.

ROTHACHER M, ZEBHAUSER B. [2000]: *GPS 3. SAPOS-Symposium- Tutorial „Einführung in GPS“*; Technische Universität München, Institut für Astronomische und physikalische Geodäsie, Fachgebiet Geodätische Raumverfahren; http://www.iapg.bv.tum.de/mediadb/-9785/9786/iapg_fesg_rpt_08.pdf; letzter Aufruf 11.12.2012.

SHIVARAMAIAH N., DEMPSTER A.G. [2009]: *The Galileo E5 AltBOC: Understanding the signal structure*; in IGNSS proceedings, IGNSS, Brisbane, presented at International Global Navigation Satellite Systems Society 2009, Surfers Paradise, Qld, 1 - 3 December 2009.

SCHÜLER E. [2008]: *Schnelle präzise Positionierung mit GPS und GALILEO unter Nutzung aktiver Referenznetzwerke*; Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 2008; <http://forschung.unibw-muenchen.de/ainfo.php?id=12213>; letzter Aufruf 12.12.2012.

SCHÜLER E., SCHÜLER T. [2005]: *GPS-Augmented Determination of k_3 Refraction Coefficient*; Proceedings of ESA Propagation Workshop, 23. November 2005, Noordwijk, Niederlande; <http://forschung.unibw.de/papers/pyi1hsmuupasm7tf6qbcwln01v4kh.pdf>; letzter Aufruf 11.12.2012.

SCHÜLER, T. [2001]: *On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation*; Dissertation, Schriftenreihe Heft 73, Studiengang Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr München, Februar 2001; <http://137.193.200.177/ediss/schueler-torben/inhalt.pdf>; letzter Aufruf 12.12.2012.

SCHÜLER T.; HEIN G.W. [2005]: *ENVISAT Radar Altimeter Calibration with High-Sea GPS Buoys*; Proceedings of the 2004 ENVISAT & ERS Symposium (Salzburg, Österreich, 6.-10. September 2004), Special Publication SP-572, ESA, Noordwijk, Niederlande, April 2005.

SCHÜLER T. [2006]: *Zum Stand der differentiellen kinematischen GPS-Positionierung*; Habilitationsschrift, Universität der Bundeswehr München, November, 2006; <http://forschung.unibw.de/papers/teiauzbjnomvpjpvjsb7jfv68plhll.pdf>. letzter Aufruf 12.12.2012.

SCHÜLER T., ARAGÓN-ÁNGEL, A.; ORÙS, R.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M; JUAN, J.M.; SANZ, J. [2005]: *Preliminary NeQuick Assessment for future single frequency users of Galileo*; http://www.isprs.org/publications/related/semana_geomatica05/front/abstracts/Dimart_s8/N04.pdf; letzter Aufruf 12.12.2012.

SCHÜLER, T. [2009]: *Long-baseline precise differential GPS positioning without use of active networks*; Festschrift—60th Anniversary Guenter W. Hein, Institute of Geodesy and Navigation, University FAF Munich, Neubiberg, Germany, pp 243–256.

SCHÜLER T., DISSONGO H., POKU-GYAMFI Y. [2010]: *Precise ionosphere-free single-frequency GNSS positioning*, GPS Solutions, DOI 10.1007/s10291-010-0177-5, published online: 26 June 2010, Springer-Verlag.

SEEBER, G. [1989]: *Satellitengeodäsie*; Verlag Walter de Gruyter, Berlin – New York, 1989, ISBN 3-11-010082-7.

SEEBER, G. [2003]: *Satellite Geodesy*; Verlag Walter de Gruyter, Berlin – New York, 2003, ISBN 3-11-017549-5.

SHI J., GAO Y. [2010]: *Analysis of the Integer Property of Ambiguity and Characteristics of Code and Phase Clocks in PPP using a Decoupled Clock Model*; Proceedings of ION GNSS 2010, September 20–24, 2010, Portland, Oregon.

SHIVARAMAIAH N., DEMPSTER A. [2009]: *The Galileo E5 AltBOC: Understanding the Signal Structure*; Proceedings of IGNSS Symposium 2009, 1-3 Dezember 2009, Australia.

SIMSKY A., MERTENS D., DE WILDE W. [2008]: *Field Experience with COMPASS -M1 E2 and E5B Signals*. Proceedings of ENC GNSS 2008, Toulouse, 22–25 April 2008.

SIMSKY A., MERTENS D., SLEEWAEGEN J.M., DE WILDE W., NAVIGATION S.S., HOLLREISER M. [2008]: *Multipath and Tracking Performance of Galileo Ranging Signals Transmitted by GIOVE-B*; Proc. ION GNSS 2008, The Institute of Navigation, 16-19 September 2008, Savannah, Georgia, Vol. 3, 1525-1536.

SLEEWAEGEN, J.-M. [1997]: *Multipath Mitigation, Benefits from using the Signal-to-Noise Ratio*; Proceedings of ION GPS 97; The Institute of Navigation, 16-19 September 1997, Kansas City, USA, pp. 531-541.

SLEEWAEGEN, J.-M. DE WILDE [2004]: *Galileo AltBOC Receiver*; Proceedings of ENC-GNSS 2004, May 17, 2004, Rotterdam..

SPIPKER, J.; PARKINSON, W. [1996]: *GPS Positioning System Theory and Applications*; Progress in Astronautics and Aeronautics Vol.163. American Institute of Aeronautics and Astronautics., pp. 57-120.

TAUBENHEIM J. [1969]: *Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten*; Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1969.

TEUNISSEN, P.J.G. [1993]: *Integer Least-Squares: Fast Estimation of the Carrier Phase Ambiguities*; First International Symposium on the Mathematical and Physical Foundations of Geodesy, September 7-9 1993, Invited paper (in print), Stuttgart.

TEUNISSEN P.J.G. [1995]: *The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation*; Journal of Geodesy 70:65-82.

TEUNISSEN P. J. G., ODIJK, D. [1997]; *Ambiguity Dilution of Precision: Definition, Properties and Application*; Proceedings of the ION GPS-97, 10th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, Kansas City Convention Center, Kansas City, Missouri, September 16-19, 1997, pp. 891-899.

TEUNISSEN P.J.G. [2000]: *The success rate and precision of GPS ambiguities*; Journal of Geodesy (2000) 74:321-326.

VAN DIERENDOCK A. J., FENTON P., FORD T. [1992]: *Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver*; Navigation: Journal of the Institute of Navigation, 39(3), pp. 265-283.

WALKER J.G. [1984]: *Satellite constellations*; Journal of the British Interplanetary Society, vol. 37, pp. 559-571, 1984.

WANG J., STEWART M.P., TSAKIRI M. [1998]: *A discrimination test procedure for ambiguity resolution on-the-fly*; Journal of Geodesy (1998) 72: 644-653.

WAHR, J.M. [1981]: *The forced nutation of an elliptical, rotating, elastic, and oceanless Earth*; Geophys. J.Roy. Astron. Soc., 64, pp. 705-727.

WANNINGER L., FREVERT V., WILDT S. [2000]: *Der Einfluss der Signalbeugung auf die präzise Positionierung mit GPS*; Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), I/2000, Dt. Verein für Vermessungswesen, pp. 8-16, Heft 1, 2000.

WARD P.W., BETZ J.W., HEGARTY C.J [2006]: *Satellite Signal Acquisition, Tracking, and Data Demodulation*; E.D. Kaplan and C.J. Hegarty, eds., Understanding GPS Principles and Applications, Second Edition, Chapter 5, Artech House, USA.

WENTAO Z. [2005]: *Triple Frequency Cascading Ambiguity Resolution for Modernized GPS and GALILEO*; UCGE Reports Number 20228, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary Canada.

WILDT, S. [2006]: *Mehrwegeausbreitung bei GNSS-gestützter Positionsbestimmung*; Dissertation, Technische Universität Dresden, Fakultät Forst-, Geo, Hydrowissenschaften, Geodätisches Institut, <http://d-nb.info/985865423/34>; letzter Aufruf 13.12.2012.

WÜBBENA, G. [1989a]: *The GPS Adjustment Software Package –GEONAP-Concepts and Models*. Proceedings of the 5th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces, New-Mexico, pp. 452-461.

WÜBBENA, G. [1991]: *Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung*; Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr.168, Hannover 1991.

XU G. [2003]: *GPS: Theory, Algorithms and Applications*; Springer Verlag; Auflage: 1 (24. Juni 2003), ISBN-10: 3540678123.

YUNCK T.P. [1996]: *Orbit determination*; In: Parkinson BW, Spilker JJ (eds) *Global positioning system—theory and applications*, AIAA, Washington D.C.

9 Danksagung

Der Inhalt dieser Arbeit basiert auf dem Projekt „SX5-Scientific Service Support based on Galileo E5 Receiver“, das im Rahmen des „7th Framework“-Programms der EU finanziert wurde. Das Projekt wurde unter Leitung des Instituts für Raumfahrttechnik und Weltraumnutzung der Universität der Bundeswehr München (UniBwM) durchgeführt. Hiermit möchte ich mich vor allem beim Leiter des Projekts und meinem „Doktorvater“, Herrn Dr. Ing. Torben Schüler, für seine tatkräftige Unterstützung bei der Entstehung meiner Dissertation, seine stets hilfreichen Ideen und seinen unermüdlichen Einsatz bedanken.

Mein Dank geht darüber hinaus an die übrigen Projektmitarbeiter der UniBwM.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei allen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung der Arbeit moralisch unterstützt und zu deren sprachlicher Verbesserung beigetragen haben:

Mein größter Dank gilt meiner Frau Irina Vilser-Diessongo, die während des letzten Jahres auf viel gemeinsame Zeit verzichten musste und dabei immer ein offenes Ohr für mich hatte. In schwierigen Zeiten kam ich in den Genuss ihrer täglichen Aufbaumühnungen. Ihr gebührt mein großer Respekt für ihre akribische sprachliche Korrektur. Wirklich danke!!!

Ein besonderer Dank gilt auch Christa und Franz Vilser, die meine Dissertation mit sehr viel Engagement sprachlich optimiert haben.

Außerdem bedanke ich mich bei meiner Familie und bei meinen Freunden für den Rückhalt und die Unterstützung in der Zeit der Fertigung der Arbeit.