

SCHNELLE PRÄZISE POSITIONIERUNG MIT GPS UND GALILEO UNTER NUTZUNG AKTIVER REFERENZNETZWERKE

eingereicht von

Dipl.-Ing. Eva Schüler

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. Bernhard Katzy

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Eissfeller

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Günter W. Hein

Die Dissertation wurde am 10. April 2008 bei der Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, D-85577 Neubiberg eingereicht.

Tag der mündlichen Prüfung: 17. November 2008

Zusammenfassung

Eine schnelle präzise Positionierung mit globalen Satellitennavigationssystemen (GNSS) erfordert die Nutzung von Trägerphasenmessungen sowie mindestens der Daten einer Referenzstation, um das Prinzip der „differentiellen Positionierung“ anwenden zu können. In den letzten Jahren haben viele europäische Staaten Netze von Referenzstationen – sogenannte „aktive Referenzstationsnetzwerke“ – aufgebaut. Hierbei werden aus den GNSS-Messungen mehrerer Referenzstationen atmosphärische Korrekturen ermittelt, die dann flächenhaft interpoliert werden und so die Ermittlung der relevanten Korrekturgrößen an der Nutzerposition (dem „Rover“) ermöglichen.

Durch ein modernisiertes GPS-System mit Signalen auf drei Frequenzen sowie das künftige europäische Satellitennavigationssystem GALILEO werden in Zukunft sowohl neue leistungsfähigere Signale auf mehr Frequenzen als auch insgesamt mehr Satelliten zur Verfügung stehen. Das wesentliche Ziel dieser Arbeit ist, die Auswirkung einer Kombination von GPS und GALILEO für die schnelle präzise Positionierung unter Nutzung aktiver Referenzstationsnetze zu untersuchen. Anhand ausgewählter Teilnetze des deutschen SAPOS[®]-Referenzstationsnetzwerkes soll eine Antwort auf die wesentliche Frage gegeben werden: Kann die gegenwärtig vergleichsweise hohe Anzahl von Referenzstationen in Zukunft reduziert werden, ohne dass die Leistungsfähigkeit des existierenden Netzes verringert wird? Eine Reduktion der Referenzstationen würde die Wirtschaftlichkeit des Dienstes steigern, da geringere Infrastrukturkosten entstehen (sowohl was die Umrüstung auf GPS+GALILEO-Empfänger betrifft, als auch was die Unterhaltung dieses Dienstes angeht).

Zu diesem Zweck werden ausgedünnte Netzkonfigurationen erzeugt und unter Nutzung synthetischer Daten die Positionierungsgenauigkeit sowie die Fixierungsmöglichkeiten der Mehrdeutigkeiten untersucht. Es wird ebenfalls aufgezeigt, in welchem Maße die Kombination der beiden GNSS die Erfolgswahrscheinlichkeit der Mehrdeutigkeitsfixierung steigern kann. Auf der anderen Seite muss bei einer Ausdünnung der Referenznetzwerke stets mit größeren Restfehler bei der Interpolation der atmosphärischen Korrekturen gerechnet werden. Aus diesem Grunde konzentriert sich diese Arbeit nicht einseitig auf die aktiven Referenznetzwerke. Vielmehr wird versucht, verbleibende Restfehler durch eine verbesserte Algorithmik bei der Rover-Positionierung zu kompensieren. Die gesteigerte Zahl an verfügbaren Satelliten und die gesteigerte Genauigkeit der Messungen auf Grund verbesserter Signalstrukturen (geringere Mehrwegefehler) machen sich hier positiv bemerkbar.

Diese Arbeit gliedert sich in drei Hauptblöcke: In den **Kapiteln 2 und 3** werden Grundlagen wie die GNSS Modernisierung sowie die Modellierung atmosphärischer Laufzeitverzögerungen bearbeitet, die für die weiteren Abschnitte von Bedeutung sind. In einem zweiten Block (**Kapitel 4 und 5**) wird zunächst das Konzept eines aktiven GNSS-Referenznetzwerkes vorgestellt, das die Ableitung der relevanten Korrekturgrößen aus den Daten der Referenzstationen erlaubt. Anschließend erfolgt eine algorithmische Beschreibung der Positionierung des Nutzers („Rover-Positionierung“). In beiden Kapiteln werden Ergebnisse aus der Verarbeitung realer GPS-Messungen dargestellt und somit gezeigt, dass die verwendete – und für diese Arbeit angepasste sowie erweiterte – hauseigene Auswertesoftware „PrePos GNSS Suite“ eine Nutzerpositionierung erlaubt, die dem gegenwärtigen Stand der Technik entspricht. Schließlich spannen die **Kapitel 6 und 7** den Bogen von der Gegenwart zur Zukunft. Diese Ergebnisse lassen sich natürlich nur basierend auf synthetischen Daten („simulierten Messungen“) gewinnen. Es werden hier die Prinzipien der synthetischen Datengenerierung besprochen sowie die Ergebnisse für die Rover-Positionierung in existierenden und ausgedünnten Netzen sowohl unter Nutzung von GPS (alleine) als auch mit GPS und GALILEO dargestellt. Die Ergebnisse werden in Kap. 8 zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf weitere relevante Aufgaben für zukünftige Forschungsarbeiten gegeben.

Abstract

The use of carrier phase measurements and at least the data of one reference station is required for fast precise differential positioning with global satellite navigation systems (GNSS). Many European countries have built up so-called “active reference station networks” during the last years. Atmospheric (and orbit) corrections are derived with help of GNSS measurements of several of these reference stations and are then interpolated via a plane surface function such that the user (“rover”) can calculate the relevant correction terms at his position.

The user will have access to new and more efficient signals on more frequencies as well as to more satellites in the near future taking into consideration the ongoing modernization of GPS with signals on three frequencies and the upcoming European satellite navigation system GALILEO. The main intention of this thesis is to investigate the benefits resulting from a combination of GPS and GALILEO for fast precise (i.e. differential carrier-phase) positioning with help of active reference station networks. The following questions are dealt with by means of selected sub-networks of the German SAPOS[®] reference network: Is it possible to reduce the currently relative high number of reference stations in future without having a poorer positioning performance in comparison of that of the existing network? Less reference stations would increase the efficiency of the service due to decreased costs of the infrastructure (concerning the change-over to combined GPS/GALILEO receiver as well as the maintenance of the service).

Thinned out network configurations are derived for these purposes and the accuracy of the positioning as well as the correct fixing of the integer ambiguity terms are investigated with help of synthetic data, and it can be proven that the ambiguity success rate will greatly benefit from a double satellite constellation such as GPS and GALILEO even in networks featuring substantially larger inter-station distances than those currently seen in SAPOS[®]. On the other hand the residual errors of the interpolation of the atmospheric corrections will inevitably increase with increasing baseline length. For this reason, this work will not only concentrate on the active reference network and the correction obtained from it, instead it is attempted to compensate remaining residuals with help of improved algorithms during rover positioning. The increased number of available satellites and the increased accuracy of the measurements due to improved signal structures (less multipath) will become noticeable in a positive way.

The work can be divided into three sections: **Chapters 2 and 3** deal with the basics like the GNSS modernization and the modelling of atmospheric delays which become more important in the following chapters. In the second section (**chapters 4 and 5**) the concept of active reference networks will be introduced which allows the derivation of the relevant corrections by use of the GNSS reference station data. Subsequently the algorithmic description of the positioning of the user (“rover positioning”) is carried out. Results of processing real GPS data are presented in both chapters, thus it can be shown that the in-house software “PrePos GNSS Suite” used (and extended) for this study allows a rover positioning which corresponds to the actual status quo in terms of positioning performance and time to first ambiguity fix. Finally, **chapters 6 and 7** portray the transition from the present to the future of GNSS precise positioning. These results, of course, currently can only be derived on the basis of synthetic data (“simulated measurements”). The principles of the generation of synthetic data are discussed as well as the results of the rover positioning in existing and thinned out reference networks by using both GPS and GPS+GALILEO pseudo range and carrier phase data. Most important results and conclusions are summarized in chapter 8 and further relevant tasks for future research are pointed out at the end of this thesis.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINFÜHRUNG	1
1.1	EINLEITUNG.....	1
1.2	ZIELSETZUNG.....	3
1.3	GLIEDERUNG	4
2	GNSS MODERNISIERUNG.....	5
2.1	GPS MODERNISIERUNG	5
2.2	GALILEO	9
2.2.1	<i>Vergleich mit GPS</i>	11
2.2.2	<i>Annahmen</i>	13
2.3	GLONASS.....	13
2.4	LINEARKOMBINATIONEN.....	14
2.4.1	<i>Linearkombinationen aus zwei Signalen</i>	15
2.4.1.1	Theoretische Grundlagen	15
2.4.1.2	Linearkombinationen für GPS.....	16
2.4.1.3	Linearkombinationen für GALILEO	17
2.4.2	<i>Linearkombinationen mit drei Signalen</i>	19
2.4.2.1	Theoretische Grundlagen	19
2.4.2.2	Linearkombinationen für GPS.....	20
2.4.2.3	Linearkombinationen für GALILEO	20
3	ATMOSPHERISCHE LAUFZEITVERZÖGERUNGEN.....	23
3.1	IONOSPHERE	23
3.1.1	<i>Aktivität der Ionosphäre</i>	25
3.1.2	<i>Relevante Phänomene</i>	26
3.1.3	<i>Refraktion und Elektroneninhalt</i>	29
3.1.4	<i>Modelle für die ionosphärische Laufzeitverzögerung</i>	34
3.1.4.1	Klobuchar-Modell.....	34
3.1.4.2	IONEX Ionosphären-Karten	35
3.2	TROPOSPHERE.....	37
3.2.1	<i>Modelle für die hydrostatische und feuchte Laufzeitverzögerung</i>	38
3.2.1.1	Blindes Modell „TropGrid“	38
3.2.1.2	Numerisches Wettermodell	46
3.2.2	<i>Relevante Phänomene</i>	47
4	AKTIVES REFERENZNETZWERK.....	51
4.1	GRUNDSÄTZLICHES.....	51
4.2	EINFÜHRUNG.....	52
4.2.1	<i>Korrekturansätze</i>	52
4.2.2	<i>Übertragungskonzepte</i>	54
4.2.2.1	Vergleich VRS – FKP.....	54
4.2.2.2	Master-Auxiliary-Konzept MAC	55
4.2.2.3	RTCM SC-104 Korrekturdatenformat	56
4.3	DATENVERARBEITUNG (NEREUS).....	59
4.3.1	<i>Vorverarbeitung (Pre-Processing)</i>	59
4.3.2	<i>Fixierung der Mehrdeutigkeiten</i>	61
4.3.2.1	Näherungsweise ionosphärenfreie Linearkombinationen (NIF).....	62
4.3.2.2	Troposphärische Referenzausgleichung (TORA)	63
4.3.2.3	Kombination von „Wide-Lane“, Ionosphärenfreier Linearkombination und „Narrow Lane“ (WIF).....	64
4.4	BERECHNUNG VON FLÄCHENKORREKTURPARAMETERN.....	65
4.4.1	<i>Allgemeines</i>	65
4.4.2	<i>Ionosphäre</i>	66

4.4.3	<i>Troposphäre</i>	68
4.4.3.1	Satelliten-spezifischer Ansatz	68
4.4.3.2	Stations-spezifische Modellierung	69
4.5	NUTZUNG VON FLÄCHENKORREKTURPARAMETERN.....	70
4.6	GENAUIGKEITSANALYSE DER FLÄCHENKORREKTURPARAMETER	71
4.6.1	<i>Netz Bayern</i>	72
4.6.2	<i>Netz Thüringen</i>	74
5	SCHNELLE GNSS POSITIONIERUNG	79
5.1	DATENVERARBEITUNGSSCHRITTE	79
5.1.1	<i>Übersicht</i>	79
5.1.2	<i>Datenaufbereitung</i>	80
5.1.3	<i>Ergänzungen und Modifikationen</i>	80
5.2	METHODEN DER MEHRDEUTIGKEITSLÖSUNG	81
5.2.1	<i>Rundung</i>	82
5.2.2	<i>Suchmethode im Beobachtungsraum</i>	82
5.2.3	<i>Geometriereduzierte Ansätze</i>	84
5.2.4	<i>Schnelle Mehrdeutigkeitslösung (Kombinationsverfahren)</i>	85
5.2.5	<i>ANSA: Kalman-Filterung unter Mitschätzung aller Störgrößen</i>	87
5.2.5.1	Beobachtungs- und Zustandsvektor	88
5.2.5.2	Transitionsmatrix und Systemrauschen	89
5.2.5.3	Initialisierung des Filters	90
5.3	ANMERKUNGEN ZUR POSITIONIERUNG	90
5.4	ERGEBNISSE AUS REALEN BEOBACHTUNGEN	91
5.4.1	<i>Gegenwärtiger Stand (SAPOS[®]-Teilnetz Bayern)</i>	92
5.4.2	<i>Ergebnisse aus dem SAPOS[®]-Teilnetz Thüringen</i>	92
5.4.3	<i>Ergebnisse aus dem SAPOS[®]-Teilnetz Bayern</i>	99
6	ERZEUGUNG SYNTHETISCHER BEOBACHTUNGSDATEN	101
6.1	FUNKTIONELLE BESCHREIBUNG	101
6.2	SIGNALE UND FREQUENZEN.....	103
6.3	BEOBACHTUNGSRÄUSCHEN	104
6.4	ORBITS	105
6.5	MEHRWEGE-FEHLER.....	106
6.6	IONOSPHERE	107
6.7	TROPOSPHERE	109
7	ZUKUNFT DER POSITIONSBESTIMMUNG.....	113
7.1	KLEINRÄUMIGES NETZ	114
7.1.1	<i>Ausfall einer Station</i>	117
7.1.2	<i>Ausfall zweier Stationen</i>	119
7.2	GROßRÄUMIGES NETZ.....	120
7.2.1	<i>Ausfall einer Station</i>	123
7.2.2	<i>Ausfall zweier Stationen</i>	125
7.3	NETZ MIT 100 KM BASISLINIENLÄNGE	126
7.3.1	<i>Nutzung von zwei Frequenzen</i>	127
7.3.2	<i>Nutzung von drei Frequenzen</i>	130
7.3.3	<i>Mitschätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung</i>	132
7.3.4	<i>Szenario mit geringerer troposphärischer Störung</i>	133
7.3.5	<i>Kinematische Rover-Positionierung</i>	134
7.3.6	<i>Nutzung des stationsspezifischen Korrekturansatzes (Troposphäre)</i>	135
7.4	NETZ MIT 200 KM BASISLINIENLÄNGE	135
7.5	NETZ BAYERN.....	137
7.6	WEITERE NETZUNABHÄNGIGE UNTERSUCHUNGEN	138
7.6.1	<i>Rover-Positionierung über mehrere Referenzstationen</i>	138

7.6.2	<i>Echte kinematische Prozessierung</i>	140
7.6.3	<i>Ionosphärenstörungen in Form von kürzeren MSTID's</i>	141
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	143
9	LITERATURVERZEICHNIS	147
A	ANHANG ZU LINEARKOMBINATIONEN	157
B	ANHANG ZU KP-WERTEN	163
C	ANHANG ZU DEN ERGEBNISSEN DER FLÄCHENKORREKTURPARAMETERANALYSE	165
D	ANHANG ZUR KORRELATIONSANALYSE DER DGPS-POSITION	172
E	ANHANG ZU DEN ERGEBNISSEN DER UNTERSUCHUNGEN DER SCHNELLEN PRÄZISEN POSITIONIERUNG MIT SEMIKA	175

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1-1: Referenzstationsnetzwerke in Finnland (links), Schweden (Mitte), Serbien (rechts oben) sowie Katalonien (rechts unten).....	2
Abbildung 2-1: Schritte der GPS-Modernisierung: links - Entwicklung bis heute, Mitte - im Jahr 2005 begonnene Modernisierung, rechts - Modernisierung in der fernerer Zukunft, aus NEILAN [2006].....	5
Abbildung 2-2: GPS-Signale im Zuge der Modernisierung; violett (L1) und braun (L2): ziviler C/A-Kode, dunkelblau: militärischer P(Y)-Kode, rot: militärischer M-Kode, türkis: drittes ziviles Signal (L5), hellgrün: viertes ziviles Signal (L1C); aus CREWS [2007].....	6
Abbildung 2-3: Signal-Rausch-Verhältnis C/N_0 für L2C, C/A, P1 und P2 Signale.....	7
Abbildung 2-4: Übersicht über die derzeitigen und zukünftigen GPS-Monitorstationen: Master Control Station (MCS) und Monitorstationen der U.S. Air Force sind mit einem schwarzen Stern gekennzeichnet, NGA-Stationen mit einem roten Punkt (unterstrichene Stationen haben eine real-time Datenverbindung mit der MCS) und NGA Test-Stationen (grünes Quadrat), aus CRANE [2007].....	8
Abbildung 2-5: Anzahl der Monitorstationen, die einen GPS-Satelliten beobachten kann, bei insgesamt sechs (oben), zwölf (Mitte) bzw. 17 (unten) verfügbaren Monitorstationen, aus CREEL ET AL. [2006].....	9
Abbildung 2-6: GALILEO Raumsegment, Quelle: ESA.....	9
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Signaldefinition von GALILEO, aus EISSFELLER ET AL. [2007a].....	10
Abbildung 2-8: Schematische Darstellung der Signaldefinition von GALILEO, Stand Juli 2007, aus EISSFELLER ET AL. [2007b].....	10
Abbildung 2-9: Grafische Veranschaulichung des Rauschens der Kode-Strecken für ausgewählte GPS und GALILEO Signale; eine Bandbreite zukünftiger Empfänger von 24 MHz gilt als realistisch, aus EISSFELLER ET AL. [2007a].....	12
Abbildung 3-1: Übersicht über die Atmosphäre (links) sowie vereinfachte und überhöhte Darstellung der Ionosphärenschichten im Tag-/Nacht-Wechsel gemäß KERTZ [1971].	23
Abbildung 3-2: Sonnenfleckenzahlstatistik der Jahre 1954-2007 (Quelle: http://sidc.oma.be/html/wolfmms.html).....	25
Abbildung 3-3: Amplitude (normiert) von MSTID's in Abhängigkeit vom Tag des Jahres (x-Achse) und der lokalen Zeit (y-Achse), beobachtet auf der Station EBRE in Spanien (40,6° N; 0,5°O); die grüne Linie repräsentiert den Sonnenauf-/untergang; Quelle: HERNÁNDEZ-PAJARES ET AL. [2006b].....	27
Abbildung 3-4: Auftreten von MSTID's (links oben), Geschwindigkeit dieser MSTID's (rechts oben), Azimut der Wanderrichtung dieser MSTID's (links unten), Periode dieser MSTID's (rechts unten); Quelle: HERNÁNDEZ-PAJARES ET AL. [2006b].....	28
Abbildung 3-5: Geographische Ausdehnung der ionosphärischen Hauptregionen; Quelle: BAUER [2003].....	29
Abbildung 3-6: Ionosphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung am 29. Oktober 2003 um 22 Uhr.....	30
Abbildung 3-7: Ionosphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung am 29. Oktober 2006 um 22 Uhr, gleiche Skalierung wie in Abbildung 3-6.....	31
Abbildung 3-8: Ionosphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung am 29. Oktober 2006 um 22 Uhr mit freier Skalierung.....	31
Abbildung 3-9: Ionosphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung am 4. November 2003 um 12 Uhr mit freier Skalierung.....	32
Abbildung 3-10: Ionosphärische Laufzeitverzögerung des GPS-Satelliten PRN 11 am Tag eines geomagnetischen Sturmes (29. Oktober 2003) an verschiedenen Stationen in Washington, D.C., USA; Quelle: DEHEL ET AL. [2004].....	32
Abbildung 3-11: Ionosphärische Laufzeitverzögerung des GPS-Satelliten PRN 38 am 20. November 2003) an verschiedenen CORS-Stationen in Ohio und Michigan, USA; die x-Achse ist mit 10 min-Intervallen skaliert; Quelle: LUO ET AL. [2005].....	33

Abbildung 3-12: Ionosphärische Laufzeitverzögerung des GPS-Satelliten PRN 10 am Tag eines geomagnetischen Sturmes (31. Oktober 2003) an verschiedenen CORS-Stationen in Florida, USA; Quelle: LUO ET AL. [2005].....	34
Abbildung 3-13: Klobuchar-Modell und dazugehörige Mappingfunktion, Quelle: MISRA UND ENGE [2001]	35
Abbildung 3-14: Interpolation von IONEX-Daten.....	36
Abbildung 3-15: Karte der für den IONEX-Vergleich verwendeten IGS-Stationen (links), RMS des doppelt differenzierten TEC in Satellitenrichtung (rechts); Quelle: ORÚS ET AL. [2003].....	37
Abbildung 3-16: links: mittlere Temperaturschichtung der Atmosphäre, neben der Höhe in km ist der entsprechende Luftdruck in hPa angegeben, Quelle: V. STORCH ET AL. [1999]; rechts: vertikale Luftdruckverhältnisse, Quelle: MALBERG [2002].....	37
Abbildung 3-17: Validierung des Refraktionskoeffizienten k_3 mit Hilfe von GPS-Messungen, Quelle: SCHÜLER [2005]	40
Abbildung 3-18: Druck [hPa] aus TropGrid für Frühjahr	44
Abbildung 3-19: Temperatur [°C] von TropGrid im Laufe der Jahreszeiten jeweils um 12 h....	45
Abbildung 3-20: ZWD [mm] von TropGrid im Laufe der Jahreszeiten jeweils um 12 Uhr.....	46
Abbildung 3-21: Numerisches Wettermodell NCEP sowie daraus abgeleitete Produkte.....	46
Abbildung 3-22: Querschnitt eines Systems mit zwei Fronten; die Dimensionen der Fronten sind nur grobe Näherungen, sie können von Front zu Front stark variieren; Quelle: GREGORIUS UND BLEWITT [1998].....	47
Abbildung 3-23: links: totale troposphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung, markiert ist jeweils der Durchzug einer Warmfront, Kaltfront oder Okklusion (Vereinigung einer Warmfront und einer nacheilenden Kaltfront); rechts: troposphärische Laufzeitverzögerung aufgeteilt in die trockene und feuchte Komponente; Quelle: GREGORIUS UND BLEWITT [1998]	48
Abbildung 3-24: Zweistündlicher Unterschied des ZPD, abgeleitet aus GPS-Messungen auf der Station WTZR über fünf Jahre (2000-2004)	49
Abbildung 3-25: Zweistündlicher Unterschied des ZPD, abgeleitet aus GPS-Messungen auf der Station POTS über fünf Jahre (2000-2004).....	49
Abbildung 3-26: Zweistündlicher Unterschied des ZPD, abgeleitet aus GPS-Messungen auf der Station VILL über fünf Jahre (2000-2004)	49
Abbildung 4-1: links: Referenzstationen des deutschen Satellitenpositionierungsdienstes SAPOS [®] der deutschen Landesvermessung; rechts: Referenzstationen des schwedischen Satellitenpositionierungsdienstes SWEPOS, Quelle: JONSSON ET AL. [2006].....	52
Abbildung 4-2: Zweidimensionale lineare Modellierung mit drei Referenzstationen.....	53
Abbildung 4-3: Zentrale und dezentrale (Rover) Berechnungsschritte bei Nutzung des Master-Auxiliary-Konzepts, von FKP und einer VRS.....	55
Abbildung 4-4: RTCM-Datensatz Version 2, Quelle: WILLGALIS [2005]	56
Abbildung 4-5: Ntrip-Konzept nach GEBHARD [2003]	58
Abbildung 4-6: Ntrip GNSS-Datenströme in Europa, Quelle: WEBER ET AL. [2005]	58
Abbildung 4-7: Empfänger-Satellit-Doppeldifferenz (Differenz der Empfänger-Einfachdifferenzen – Differenz der an zwei Empfängern A und B zeitgleich beobachteten Signale – zu zwei Satelliten i und j)	61
Abbildung 4-8: „Discrimination test“ für nur GPS L1/L2 (oben) bzw. GPS L1/L5 und GALILEO E1/E5a (unten) bei einer Positionierung über 10 min; man beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse.....	64
Abbildung 4-9: Stationsanordnung für Berechnung von Flächenkorrekturparametern	66
Abbildung 4-10: Übersicht über die bayerischen SAPOS [®] -Referenzstationen	72
Abbildung 4-11: Nördliches und südliches Teilnetz; blaue Stationen werden als Referenzstationen genutzt, die rote als “Rover“; Höhen sind ellipsoidische Höhen	73
Abbildung 4-12: Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse für Bayern (links: nördliches Teilnetz, rechts: südliches Teilnetz) für Tag 138 des Jahres 2006; Differenzen wurden für die Ionosphäre über 120 s, für die Troposphäre über 300 s geglättet	74
Abbildung 4-13: Übersicht über die thüringischen SAPOS [®] -Referenzstationen	75
Abbildung 4-14: Drei Teilnetze für die Untersuchung von Flächenkorrekturparametern;	

Referenzstationen in blau, „Rover“-Station in rot; ellipsoidische Höhen.....	75
Abbildung 4-15: Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse für Thüringen für die Tage 254 bzw. 255 des Jahres 2005; Differenzen wurden für die Ionosphäre über 120 s, für die Troposphäre über 300 s geglättet.....	76
Abbildung 5-1: LAMBDA-Methode: Darstellung der Suchellipse vor (links) und nach (rechts) nach der Transformation, Quelle: MISRA UND ENGE [2001]	83
Abbildung 5-2: Zeit bis zu einer RTK-Lösung, abgeleitet aus bayerischen SAPOS [®] -Nutzerdaten im Zeitraum 9.-11. Mai 2006, bereitgestellt von der LVG Bayern; Fixierungszeiträume größer 5 min wurden nicht berücksichtigt; links Darstellung als Histogramm, rechts kumuliertes Histogramm	92
Abbildung 5-3: links: differentieller ionosphärischer Fehler in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung sowie I95 Index und vertikaler Elektronengehalt unter verschiedenen ionosphärischen Bedingungen; rechts: wöchentliche Mittelwerte des stündlichen I95-Index in Deutschland; Quelle: WANNINGER [2004]	93
Abbildung 5-4: Ionosphärischer Index I95 für das thüringische SAPOS [®] -Netz im Zeitraum 11.-13. September 2005 (Quelle: http://www.sapos.thueringen.de)	94
Abbildung 5-5: Ionosphärischer Modellrestfehler für das thüringische SAPOS [®] -Netz im Zeitraum 11.-13. September 2005 (Quelle: http://www.sapos.thueringen.de).....	95
Abbildung 5-6: Geometrischer Modellrestfehler für das thüringische SAPOS [®] -Netz im Zeitraum 11.-13. September 2005 (Quelle: http://www.sapos.thueringen.de).....	95
Abbildung 5-7: 3D-Positionsfehler für <u>kleines</u> Teilnetz, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off..	96
Abbildung 5-8: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linearkombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar) für <u>kleines</u> Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off.....	97
Abbildung 5-9: 3D-Positionsfehler für <u>mittleres</u> Teilnetz, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off..	97
Abbildung 5-10: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linearkombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar) für <u>mittleres</u> Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off.....	98
Abbildung 5-11: 3D-Positionsfehler für <u>großes</u> Teilnetz, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off..	98
Abbildung 5-12: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linearkombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar) für <u>großes</u> Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off.....	98
Abbildung 5-13: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off	99
Abbildung 5-14: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linearkombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar); 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off	100
Abbildung 6-1: Abstrahlzeitpunkt t_{SAT} und Beobachtungsepoche t	101
Abbildung 6-2: Ablaufdiagramm für Berechnung synthetischer Beobachtungsdaten.....	102
Abbildung 6-3: Ableitung des Kode-Beobachtungsrauschens nach PRATT ET AL. [2006].....	104
Abbildung 6-4: Räumliche Festlegung einer Satellitenbahn, Quelle: BAUER [2003]	105
Abbildung 6-5: Koeffizienten aus der Fourieranalyse	107
Abbildung 6-6: Darstellung des ionosphärischen Subpunktes, Quelle: MISRA UND ENGE [2001]	108
Abbildung 6-7: Simulation einer ionosphärischen Störung	108
Abbildung 6-8: Simulation einer troposphärischen Störung.....	109
Abbildung 6-9: Troposphärische Störung auf Stationen unterschiedlicher Länge.....	110
Abbildung 7-1: Links: kleinräumiges Netz; rechts: großräumiges Netz	113
Abbildung 7-2: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar)	115
Abbildung 7-3: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar)	115

Abbildung 7-4: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen.....	116
Abbildung 7-5: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen.....	116
Abbildung 7-6: Horizontaler Positionsfehler, eingeteilt in 2 Genauigkeitsklassen	117
Abbildung 7-7: Netzkonfiguration beim Ausfall einer Station und Hinzunahme einer entsprechend nächstgelegenen Station im kleinräumigen Netz	118
Abbildung 7-8: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar) beim Ausfall einer Referenzstation.....	118
Abbildung 7-9: 3D-Positionsfehler für Szenario M VII beim Ausfall einer Referenzstation	118
Abbildung 7-10: Netzkonfiguration beim Ausfall von zwei Stationen und Hinzunahme zweier entsprechend nächstgelegener Stationen im kleinräumigen Netz	119
Abbildung 7-11: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar) beim Ausfall zweier Referenzstation	119
Abbildung 7-12: 3D-Positionsfehler für Szenario M VII beim Ausfall zweier Referenzstationen.....	120
Abbildung 7-13: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar).....	121
Abbildung 7-14: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar).....	121
Abbildung 7-15: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen.....	122
Abbildung 7-16: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen.....	122
Abbildung 7-17: Horizontaler Positionsfehler, eingeteilt in 2 Genauigkeitsklassen.....	123
Abbildung 7-18: Netzkonfiguration beim Ausfall von einer Station und Hinzunahme einer entsprechend nächstgelegenen Station im großräumigen Netz.....	123
Abbildung 7-19: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar).....	124
Abbildung 7-20: 3D-Positionsfehler für Szenario M VII ohne Ausfall einer Referenzstation ..	124
Abbildung 7-21: 3D-Positionsfehler für Szenario M VII beim Ausfall einer Referenzstation ..	125
Abbildung 7-22: Netzkonfiguration beim Ausfall von zwei Stationen und Hinzunahme zweier entsprechend nächstgelegener Stationen im großräumigen Netz.....	125
Abbildung 7-23: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar).....	126
Abbildung 7-24: 3D-Positionsfehler für Szenario M VII.....	126
Abbildung 7-25: Netzwerkkonfiguration für Rover-Positionierungen bis zu einer Basislinienlänge von ca. 100 km.....	127
Abbildung 7-26: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar).....	128
Abbildung 7-27: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar).....	128
Abbildung 7-28: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen.....	129
Abbildung 7-29: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen.....	129
Abbildung 7-30: Horizontaler Positionsfehler, eingeteilt in 2 Genauigkeitsklassen	130
Abbildung 7-31: „Success rate“ für nur GPS L1/L2 (oben) bzw. GPS L1/L5 und GALILEO E1/E5a (unten) bei einer Positionierung über 120 sec	130
Abbildung 7-32: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar) für die Szenarien M IV bzw. M V; Nutzung von 2 oder 3 Frequenzen.....	131
Abbildung 7-33: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen.....	131
Abbildung 7-34: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; Mitschätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung bei der PDGPS-Positionierung.....	132
Abbildung 7-35: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar) für Szenario M V; Mitschätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung bei der PDGPS-Positionierung.....	133
Abbildung 7-36: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; Simulation mit geringerem Troposphärenfehler	133
Abbildung 7-37: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen.....	134
Abbildung 7-38: Horizontaler Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen	134
Abbildung 7-39: Horizontaler Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen	135
Abbildung 7-40: Netzwerkkonfiguration für Rover-Positionierungen bis zu einer Basislinienlänge von ca. 200 km.....	136
Abbildung 7-41: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar).....	136
Abbildung 7-42: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen.....	137
Abbildung 7-43: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; Mitschätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung bei der PDGPS-Positionierung.....	137

Abbildung 7-44: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar) für Szenario M V.....	138
Abbildung 7-45: 3D-Positionsfehler für Szenario M V, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen	138
Abbildung 7-46: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar) bei Anbindung des Rover an eine/drei/vier Referenzstationen.....	139
Abbildung 7-47: 3D-Positionsfehler bei Anbindung des Rover an eine/drei/vier Referenzstationen, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen	139
Abbildung 7-48: Track für echte kinematische Prozessierung	140
Abbildung 7-49: Dreidimensionaler Positionsfehler bei der echten kinematischen Prozessierung.....	141
Abbildung 7-50: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar) unter Verwendung von kleinskaligeren TID's.....	142
Abbildung 7-51: Dreidimensionaler Positionsfehler unter Verwendung von kleinskaligeren TID's.....	142
Abbildung B-1: K_p -Werte für das Jahr 2003 in Form eines „Musikdiagramms“	163
Abbildung B-2: K_p -Werte für das Jahr 2006 in Form eines „Musikdiagramms“	164
Abbildung C-1: Doppelt differenziertes ionosphärisches Residuum im Teilnetz 1 mit einer durchschnittlichen Basislinienlänge von 27 km; jeweils im Bereich -240 – 165 mm.....	167
Abbildung C-2: Doppelt differenziertes ionosphärisches Residuum im Teilnetz 2 mit einer durchschnittlichen Basislinienlänge von 50 km; jeweils im Bereich -360 – 390 mm.....	168
Abbildung C-3: Doppelt differenziertes ionosphärisches Residuum im Teilnetz 3 mit einer durchschnittlichen Basislinienlänge von 67 km; jeweils im Bereich -670 – 500 mm.....	169
Abbildung D-1: Korrelationsanalyse für ein Zeitintervall von 10 s.....	172
Abbildung D-2: Korrelationsanalyse für ein Zeitintervall von 20 s.....	173
Abbildung D-3: Korrelationsanalyse für ein Zeitintervall von 40 s.....	174
Abbildung E-1: 3D-Positionsfehler für <u>kleines</u> Teilnetz, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off	176
Abbildung E-2: Grafische Darstellung zu Tabelle E-4	177
Abbildung E-3: 3D-Positionsfehler für <u>mittleres</u> Netz, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off	178
Abbildung E-4: Grafische Darstellung zu Tabelle E-6	179
Abbildung E-5: 3D-Positionsfehler für <u>großes</u> Teilnetz, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off	180
Abbildung E-6: Grafische Darstellung zu Tabelle E-8	181
Abbildung E-7: 3D-Positionsfehler für nördliches bayerisches Teilnetz, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off.....	182

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1: Aktueller System-Status von GPS (Stand 22.02.2008); Quelle: http://earth-info.nima.mil/GandG/sathtml/satinfo.html	7
Tabelle 2-2: Frequenzen und Modulation der GALILEO-Signale; OS: Open Service; SoL: Safety of Life; CS: Commercial Service; PRS: Public Regulated Service; Mcps: Megachips per second; sps: symbols per second	11
Tabelle 2-3: Rauschen der Kode-Strecken für GPS und GALILEO Empfänger bei einem angenommenen Träger-zu-Rauschverhältnis (C/N_0) von einheitlich 45 dB Hz, aus EISSFELLER ET AL. [2007a]	12
Tabelle 2-4: Maximale (Einhüllende) und repräsentative mittlere Mehrwege-Fehler für GPS und GALILEO Kode-Beobachtungen bei Verwendung „enger“ Korrelation zur Mehrweg-Reduktion, aus EISSFELLER ET AL. [2007a]	13
Tabelle 2-5: Aktueller System-Status von GLONASS am 4. Oktober 2007, Quelle: http://www.glonass-ianc.rsa.ru	14
Tabelle 2-6: Ausgewählte Linearkombinationen aus zwei Signalen für GPS	17
Tabelle 2-7: Ausgewählte Linearkombinationen aus zwei Signalen für GALILEO.....	18
Tabelle 2-8: Ausgewählte Linearkombinationen aus drei Signalen für GPS	20
Tabelle 2-9: Ausgewählte Linearkombinationen aus drei Signalen für GALILEO.....	21
Tabelle 3-1: Aufbau und Charakteristika der Ionosphärenschichten (KERTZ [1971], SEEBER [1989]).....	24
Tabelle 3-2: Meteorologische Parameter von TropGrid.....	43
Tabelle 4-1: Vergleich der Übertragungskonzepte nach WANNINGER [2006]	56
Tabelle 4-2: Nachrichtentypen in der RTCM Version 3	57
Tabelle 4-3: Übersicht über die vom IGS angebotenen Orbit-Produkte	60
Tabelle 4-4: Näherungsweise ionosphärenfreie Linearkombinationen; zusätzliche Linearkombinationen werden für höhere Integrität verwendet	62
Tabelle 4-5: Linearfaktoren für das ionosphärische bzw. troposphärische Residuum	67
Tabelle 5-1: Für den geometriereduzierten Ansatz verwendete Linearkombinationen; hierbei gibt es jeweils zwei mögliche Sets an Linearkombinationen für den Nahbereich und den Fernbereich; die in Klammern gesetzten Linearkombinationen werden nur verwendet, wenn der Nutzer eine Überbestimmung und somit eine Kontrolle der Mehrdeutigkeitsfixierung wünscht.	85
Tabelle 5-2: Für Kombinationsverfahren verwendete Linearkombinationen	86
Tabelle 5-3: Zweistündige Mittelwerte der DGPS-Positionsdifferenzen [m]	91
Tabelle 6-1: Maximalwerte für Code- und Carrier-Mehrwege-Fehler, Quelle: AVILA-RODRIGUEZ ET AL. [2004]	107
Tabelle 6-2: Extreme Wetterereignisse innerhalb einer Stunde auf der IGS-Station Wettzell... 110	
Tabelle 6-3: Berechnung der Differenz des ZPD auf Station Wettzell	111
Tabelle 7-1: Simulationseinstellungen für die Ionosphäre.....	114
Tabelle 7-2: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar) für kleinräumiges Netz	115
Tabelle 7-3: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar)	120
Tabelle 7-4: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar)	127
Tabelle A-1: Linearkombinationen aus zwei Signalen für GPS.....	158
Tabelle A-2: Linearkombinationen aus zwei Signalen für GALILEO	160
Tabelle A-3: Linearkombinationen aus drei Signalen für GPS.....	161
Tabelle A-4: Linearkombinationen aus drei Signalen für GALILEO	162
Tabelle C-1: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für nördliches Teilnetz; Tag 138 des Jahres 2006; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 10° cut-off	165
Tabelle C-2: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für südliches Teilnetz; Tag 138 des Jahres 2006; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 10° cut-off	165

Tabelle C-3: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für nördliches Teilnetz plus Station AUER; Tag 138 des Jahres 2006; 2, 2+V, 3 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 10° cut-off.....	166
Tabelle C-4: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für südliches Teilnetz plus Station MIND; Tag 138 des Jahres 2006; 2, 2+V, 3 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 10° cut-off.....	166
Tabelle C-5: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für Teilnetz 1; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off	170
Tabelle C-6: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für Teilnetz 1; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = IONEX, Troposphärenmodell = TropGrid; 15° cut-off.....	170
Tabelle C-7: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für Teilnetz 2; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off	170
Tabelle C-8: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für Teilnetz 2; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = IONEX, Troposphärenmodell = TropGrid; 15° cut-off.....	171
Tabelle C-9: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für Teilnetz 3; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off	171
Tabelle C-10: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für Teilnetz 3; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = IONEX, Troposphärenmodell = TropGrid; 15° cut-off.....	171
Tabelle E-1: Mittlerer Positionsfehler (horizontal / vertikal / gesamt) [mm] für kleines, mittleres und großes Teilnetz; keine Flächenkorrekturparameter verwendet; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = TropGrid; 15° cut-off	175
Tabelle E-2: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linearkombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar) für kleines, mittleres und großes Teilnetz; keine Flächenkorrekturparameter verwendet; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = TropGrid; 15° cut-off.....	175
Tabelle E-3: Mittlerer Positionsfehler (horizontal / vertikal / gesamt) [mm] für <u>kleines</u> Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off	176
Tabelle E-4: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linearkombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar) für <u>kleines</u> Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off	177
Tabelle E-5: Mittlerer Positionsfehler (horizontal / vertikal / gesamt) [mm] für <u>mittleres</u> Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off.....	178
Tabelle E-6: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linearkombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar) für <u>mittleres</u> Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off.....	179
Tabelle E-7: Mittlerer Positionsfehler (horizontal / vertikal / gesamt) [mm] für <u>großes</u> Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off	180
Tabelle E-8: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linearkombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar) für <u>großes</u> Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off	181
Tabelle E-9: Mittlerer Positionsfehler (horizontal / vertikal / gesamt) für nördliches bayerisches Teilnetz [mm]; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off.....	183
Tabelle E-10: Mehrdeutigkeitsfixierung für nördliches bayerisches Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off	183
Tabelle E-11: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linearkombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar); 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off	184

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ADOP	Ambiguity Dilution of Precision
AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen
AGNES	Automatisches GPS Netz Schweiz
AGW	Atmospheric Gravity Waves
AII	Accuracy Improvement Initiative
ANSA	All-Inclusive Sequential Ambiguity Filter
ARP	Antennenreferenzpunkt
BOC	Binary Offset Carrier
BPS	Bits per second
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CBOC	Composite Binary Offset Carrier
CME	Coronal Mass Ejections
CODE	Center for Orbit Determination
CORS	Continuously Operating Reference Stations
CRC	Cyclic Redundancy Check
CS	Commercial Service
DoD	Departement of Defense
DoW	Day of Week
DoY	Day of Year
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EPS	Echtzeit Positionierungsservice
ESA	European Space Agency
ESTEC	European Space Research and Technology Centre
EU	European Union
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FKP	Flächenkorrekturparameter
GCS	Ground Control Segment
GDAS	Global Data Assimilation System
GFZ	GeoForschungsZentrum
GNSS	Globale Satellitennavigationssysteme
GPPS	Geodätischer Postprocessing Positionierungsservice
GPS	Global Positioning System
GSTB	GALILEO System Test Bed
HEPS	Hochpräziser Echtzeit Positionierungsservice
IDS	Integrity Determination System
IGS	International GPS Service
IONEX	Ionosphere Map Exchange
IRIM	Ionospheric Residuals Integrity Monitoring
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LAMBDA	Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment
MAC	Master-Auxiliary-Concept
MBOC	Multiplexed Binary Offset Carrier
MCS	Master Control Station
MEO	Medium Earth Orbit
MSTID	Medium Scale Travelling Ionospheric Disturbances
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
OS	Open Service
OSI	Open Systems Interconnection
PNT	Positioning, Navigation, Timing
PRS	Public Regulated Service
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RTCM	Radio Transmission Committee for Marine Applications
RTK	Real Time Kinematic
SAPOS [®]	Satellitenpositionierungsdienst
SINEX_TRO	Solution Independent Exchange Format for Combinations of Tropospheric Estimates
SIS	Signal-In-Space
SoL	Safety of Life
SPD	Slant Path Delay
SWEPOS	Schwedischer Positionierungsdienst
SWIPOS	Schweizer Positionierungsdienst
TEC	Total Electron Content
TECU	Total Electron Content Unit
TID	Travelling Ionospheric Disturbances
TORA	Tropospheric Reference Adjustment
TROPEX	Tropospheric Exchange Format
TTC	Telemetry, Tracking and Control
UPC	Universitat Politècnica de Catalunya
URE	User Range Error
USAF	United States Air Force
USNO	United States Naval Observatory
VRS	Virtuelle Referenzstation
VTEC	Vertical Total Electron Content
WWW	World Wide Web
XML	Extensible Markup Language
ZHD	Zenith Hydrostatic Delay
ZND	Zenith Neutral Delay
ZPD	Zenith Path Delay
ZWD	Zenith Wet Delay

1 Einführung

1.1 Einleitung

Seit der Einführung des US-amerikanischen GPS-Systems in den 80er Jahren und seiner vollen operationellen Einsatzfähigkeit im Jahr 1995 hat sich im Bereich der präzisen Positionierung ein tiefgreifender Wandel vollzogen. Globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) ermöglichen durch die Nutzung von Trägerphasenmessungen eine Positionierung hoher Genauigkeit. Im unmittelbaren Nahbereich – einige 100 m – kann diese zwar immer noch von konventionellen Vermessungstechniken (Totalstation) überboten werden, über größere Entfernungen zeigt sich jedoch die Satellitenpositionierung als ausgesprochen leistungsstark. So können beispielsweise Grundlagennetze heutzutage sehr wirtschaftlich und gleichzeitig hochpräzise mit den neuen Methoden beobachtet werden, aber auch im Bereich der schnellen präzisen Positionierung mit seinem weiter wachsenden Anwendungsspektrum haben sich die GNSS inzwischen fest etabliert. Eine schnelle Positionierung (RTK-Verfahren) erfordert jedoch im Allgemeinen die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten, deren Lösung aufgrund atmosphärischer Restfehler bei kurzen Beobachtungsdauern nicht über längere Entfernungen gelingt.

Werden Trägerphasenmessungen zur präzisen Positionierung herangezogen, wird in der Regel das Prinzip der „differenziellen Positionierung“ genutzt, worunter die Verwendung von mindestens einer Referenzstation, die auf einem bekannten Punkt stationiert ist, verstanden wird. Dabei handelt sich nicht um ein differentielles Verfahren im eigentlichen Sinne (wie in der Infinitesimalrechnung), sondern um ein Differenzverfahren: Zumeist wird eine doppelte Differenzbildung angewendet, d.h. es werden zunächst Differenzen zwischen den Beobachtungen zu einem Primär- und einem Sekundärsatelliten auf einer Station gebildet und anschließend eine Differenzbildung mit der Einfachdifferenz auf einer zweiten Station (Referenzstation) ermittelt; dieses Vorgehen wird in der Alltagssprache häufig fälschlicherweise als „Differenzierung“ bezeichnet. Der wesentliche Vorteil dieser Differenzbildung ist, dass über kurze Entfernungen zur Referenzstation die atmosphärischen Fehlergrößen aufgrund ihrer hohen räumlichen Korrelation effizient reduziert werden können. Als Grenzwert für die Entfernung zu einer Referenzstation können bei der klassischen Methode der RTK-Messung ca. 10 km festgesetzt werden, ohne dass im Normalfall größere Probleme bei der Fixierung der Mehrdeutigkeiten auf ihren ganzzahligen Wert auftreten. Dieser Grenzwert gilt natürlich nur unter der Voraussetzung, dass eine stabile Kommunikation über diese Entfernung gewährleistet werden kann. In einem Dienstkonzept könnte auf diese Weise eine Fläche von ca. 300 km² abgedeckt werden. Würde man also die gesamte Fläche der Bundesrepublik Deutschland (ca. 357100 km²) mit einem derartigen präzisen RTK-Dienst abdecken wollen, so wären demnach mindestens ca. 1100 Referenzstationen notwendig, was einen enorm hohen wirtschaftlichen Aufwand darstellen würde.

Um diese Zahl an Referenzstationen deutlich zu reduzieren, werden heute sogenannte „aktive Referenzstationsnetzwerke“ betrieben, d.h. aus den GNSS-Messungen mehrerer Referenzstationen werden atmosphärische Korrekturen ermittelt, die dann flächenhaft interpoliert werden und so die Ermittlung der relevanten Korrekturgößen an der Nutzerposition (dem „Rover“) ermöglichen. Auf diese Art und Weise kann die Entfernung zur nächstgelegenen Referenzstation – unter alleiniger Nutzung von GPS – auf mindestens 30 km bis maximal 60 km reduziert werden, ohne dass die Leistungsfähigkeit des RTK-Dienstes hinter der klassischen Methode zurücksteht. Durch diese deutliche Vergrö-

ßerung des Referenzstationsabstandes kommen im deutschen SAPOS[®]-Dienst der Landesvermessungsverwaltungen ca. 250 Stationen zum Einsatz. Dies entspricht einem Reduktionsfaktor von 4,4 gegenüber dem klassischen Ansatz.

In den letzten Jahren wurden vergleichbare Echtzeit-Netzwerke für präzise Positionierungsanwendungen (sowohl in Echtzeit als auch in der Postprozessierung) in vielen Regionen Europas aufgebaut oder befinden sich gegenwärtig im Aufbau, was die infrastrukturelle bzw. wirtschaftliche Bedeutung derartiger Dienste eindrucksvoll unterstreicht. Exemplarisch sind in Abbildung 1-1 einige aktuelle Beispiele dargestellt.

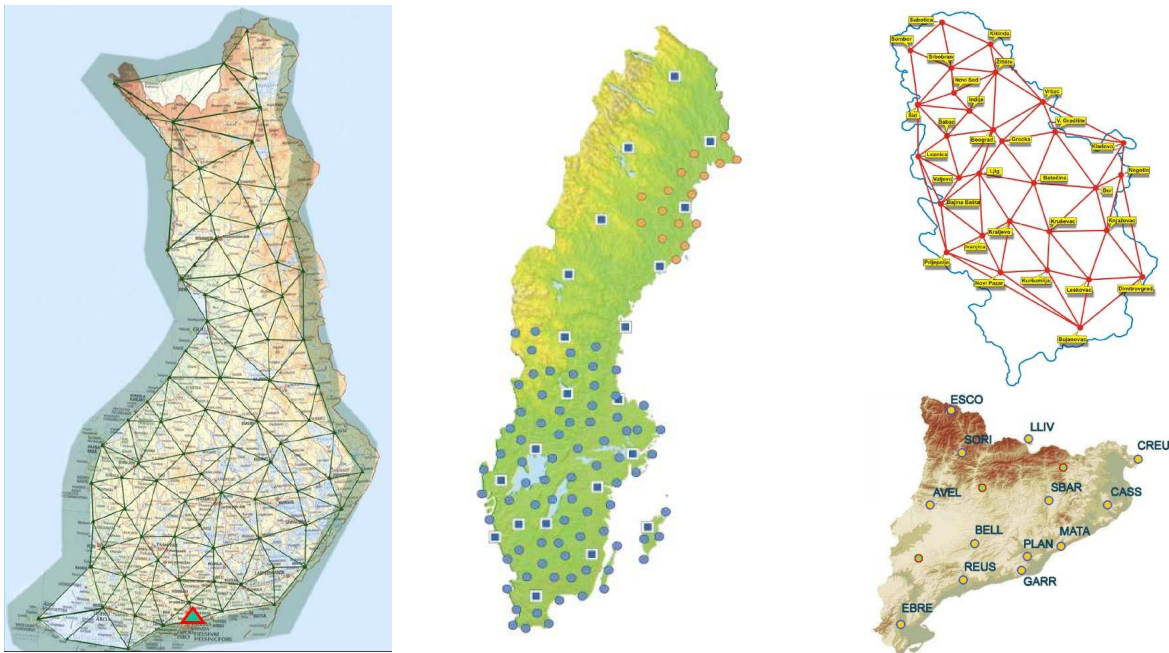


Abbildung 1-1: Referenzstationsnetzwerke in Finnland¹ (links), Schweden² (Mitte), Serbien³ (rechts oben) sowie Katalonien⁴ (rechts unten)

So wird in Finnland seit Mai 2005 von der Firma Geotrim Ltd. ein weitgehend flächendeckendes Netz mit 86 Stationen betrieben, was einem Reduktionsfaktor von 12,5 gegenüber einem konventionellen Basislinien-RTK entspricht (Finnlands Landesfläche beträgt 338000 km²). Der Aspekt der Wirtschaftlichkeit wird im finnischen Netz gegenüber der deutschen – dezentralen und staatlichen – Lösung also erheblich stärker betont. Die Nutzergebühren für den präzisen RTK-Dienst betragen für eine Einzellizenz 2600 - 3500 € pro Jahr zuzüglich den Kommunikationskosten für GSM/GPRS.

Auch ein Blick in andere europäische Staaten zeigt, dass die Referenzstationsdichte in Deutschland vergleichsweise hoch ist. In Serbien wurde bis 2005 ein Referenzstationsnetzwerk mit insgesamt 32 Stationen aufgebaut, womit die Landesfläche nahezu vollständig abgedeckt ist (lediglich einige südliche Landesteile sind nicht abgedeckt); es ergibt

¹ Quelle: TÖTTERSTRÖM, S. [2006]: *VRS-RTK Network Service in Finland*; Vortrag auf dem GPSNet User Seminar 2006, 30.-31. Mai 2006, München; WWW: http://cors-tr.iku.edu.tr/images/Seppo_Totterstrom%20-%20GPSnet_fi.pdf

² Quelle: JONSSON, B., G. HEDLING, P. WIKLUND, A. FRISK [2006]: *SWEPOS Services – status, applications and experiences*; Vortrag auf dem GPSNet User Seminar 2006, 30.-31. Mai 2006, München; WWW: http://cors-tr.iku.edu.tr/images/Peter_Wiklund%20-%20SWEPOS%20Munich.pdf

³ Quelle: ODALOVIC, O. [2006]: *Nation-wide Trimble VRS system in Serbia*; Vortrag auf dem GPSNet User Seminar 2006, 30.-31. Mai 2006, München; WWW: http://cors-tr.iku.edu.tr/images/Oleg_Odalovic%20-%20Nation-wide%20VRS%20System%20in%20Serbia.pdf

⁴ Quelle: BOSCH, E. [2006]: *Operation issues and specifics of ICC, settings and interoperability*; Vortrag auf dem GPSNet User Seminar 2006, 30.-31. Mai 2006, München; WWW: http://cors-tr.iku.edu.tr/images/Ernest_Bosch%20-%20GPSNET2006_ICC.pdf

sich hier ein Reduktionsfaktor von 8,8 gegenüber der konventionellen Methode. Des Weiteren existieren regionale Lösungen beispielsweise für Norditalien⁵ und Katalonien. In dem katalonischen Regionalnetzwerk „CATNET“ kommen insgesamt 19 Stationen zum Einsatz, darunter eine IGS-Station und 4 EUREF-Stationen, wodurch sich bei einer Fläche von lediglich 32000 km² ein Reduktionsfaktor von 5,4 ergibt.

1.2 Zielsetzung

Gegenwärtig spielt das US-amerikanische GPS-System eine dominierende Rolle in der präzisen RTK-Positionierung. Es ist das einzige (mehr als) voll ausgebaute globale Satellitennavigationssystem und wurde/wird fortlaufend verbessert. Das russische GLO-NASS-System hat zwar aus Marketing-Sicht an Bedeutung gewonnen, nimmt aber in der Praxis faktisch nach wie vor eine klare Nebenrolle ein, da die gegenwärtige Zahl an real verfügbaren Satelliten zu gering ist (lediglich 9 Satelliten im Oktober 2007, s. auch Kapitel 2.3).

In Zukunft wird GPS durch das europäische GALILEO-System, das ca. 2013/14 seine volle operationelle Einsatzfähigkeit erreicht haben soll, Konkurrenz erhalten. Dieses System wird weitgehend kompatibel zum existierenden GPS-System sein und eignet sich daher zur Integration. In diesem Sinne steht als wesentliches Ziel dieser Arbeit die Auswirkung einer **Kombination** von GPS und GALILEO für die schnelle präzise Positionierung unter Nutzung aktiver Referenzstationsnetze im Vordergrund. Dabei orientieren sich die Untersuchungen an den Leistungsparametern des gegenwärtigen SAPOS[®]-Netzes in Deutschland. Anhand ausgewählter SAPOS[®]-Teilnetze soll eine Antwort auf die wesentliche Frage gegeben werden: Kann die gegenwärtig vergleichsweise hohe Anzahl von Referenzstationen in Zukunft reduziert werden, ohne dass die Leistungsfähigkeit des existierenden Netzes verringert wird? Eine Reduktion der Referenzstationen würde die Wirtschaftlichkeit des Dienstes steigern, da geringere Infrastrukturkosten entstehen (sowohl was die Umrüstung auf GPS+GALILEO-Empfänger betrifft, als auch was die Unterhaltung dieses Dienstes angeht).

Zu diesem Zweck werden – ausgehend von den existierenden Teil-Netzwerken – ausgedünnte Netzkonfigurationen erzeugt und unter Nutzung synthetischer Daten die Positionierungsgenauigkeit sowie die Fixierungsmöglichkeiten der Mehrdeutigkeiten untersucht. Es soll ebenfalls aufgezeigt werden, in welchem Maße die Kombination der beiden GNSS die Erfolgswahrscheinlichkeit der Mehrdeutigkeitsfixierung steigern kann. In diesem Zusammenhang wird der Schwerpunkt auf die Nutzung von zukünftigen kombinierten Zweifrequenzempfängern gelegt, aber die Nutzung von Messungen auf mehr als zwei Trägerfrequenzen wird ebenfalls untersucht. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit darf aber im Vergleich zu Triple- oder Mehr-Frequenzempfängern von deutlich geringeren Kosten für 2-Frequenzsysteme ausgegangen werden. Auf der anderen Seite muss bei einer Ausdünnung der Referenznetzwerke stets mit größeren Restfehler bei der Interpolation der atmosphärischen Korrekturen gerechnet werden. Aus diesem Grunde konzentriert sich diese Arbeit nicht einseitig auf die aktiven Referenznetzwerke. Vielmehr wird versucht, verbleibende Restfehler durch eine verbesserte Algorithmik bei der Rover-Positionierung zu kompensieren. Die gesteigerte Zahl an verfügbaren Satelliten und die gesteigerte Genauigkeit der Messungen auf Grund verbesserter Signalstrukturen (geringere Mehrwegefehler) dürften sich hier positiv bemerkbar machen.

⁵ Quelle: VASSENA, G. [2006]: *The VRS GPSNet Demo Network in North Italy*; Vortrag auf dem GPSNet User Seminar 2006, 30.-31. Mai 2006, München; WWW: http://cors-tr.iku.edu.tr/images/Giorgio_Vasseba%20-%20VRS%20network%20in%20North%20Italy.pdf.

1.3 Gliederung

Diese Arbeit gliedert sich in drei Hauptblöcke: In den **Kapiteln 2 und 3** werden Grundlagen bearbeitet, die für die weiteren Abschnitte von Bedeutung sind. Dies umfasst Aspekte der GNSS Modernisierung (Kap. 2) und die Beschreibung bzw. Modellierung atmosphärischer Laufzeitverzögerungen (Kap. 3), die die schnelle GNSS-Positionierung wesentlich erschweren. In einem zweiten Block (**Kapitel 4 und 5**) werden die angewandten Methoden vorgestellt. Zunächst wird das Konzept eines aktiven GNSS-Referenznetzwerkes (Kap. 4) vorgestellt, das die Ableitung der relevanten Korrekturgrößen aus den Daten der Referenzstationen erlaubt. Anschließend erfolgt eine algorithmische Beschreibung der Positionierung des Nutzers („Rover-Positionierung“, Kap. 5). In beiden Kapiteln werden Ergebnisse aus der Verarbeitung realer GPS-Messungen dargestellt und somit gezeigt, dass die verwendete – und für diese Arbeit angepasste sowie erweiterte – hauseigene Auswertesoftware „PrePos GNSS Suite“ eine Nutzerpositionierung erlaubt, die dem gegenwärtigen Stand der Technik entspricht. Schließlich spannen die **Kapitel 6 und 7** den Bogen von der Gegenwart zur Zukunft. Diese Ergebnisse lassen sich natürlich nur basierend auf synthetischen Daten („simulierten Messungen“) gewinnen. Die Prinzipien der synthetischen Datengenerierung werden in Kap. 6 besprochen; die Ergebnisse für die Rover-Positionierung in existierenden und ausgedünnten Netzen sowohl unter Nutzung von GPS (alleine) als auch mit GPS und GALILEO werden in Kap. 7 dargestellt. Die Ergebnisse werden in Kap. 8 zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf weitere relevante Aufgaben für zukünftige Forschungsarbeiten gegeben.

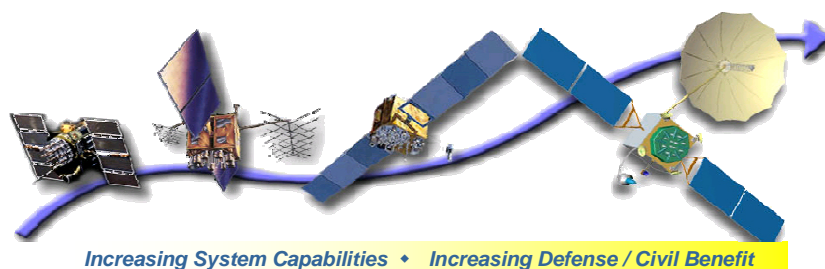
2 GNSS Modernisierung

Nachdem in den letzten 10-20 Jahren der Bereich der Satellitennavigation mit dem amerikanischen Global Positioning System (GPS) mehr oder weniger gleichgesetzt wurde, zeichnet sich nun dieser gegenwärtig durch eine hohe Entwicklungsdynamik aus. Zum einen wandelt sich GPS von einem primär auf das Militär ausgerichteten System hin zu einem System, das auch die Interessen der zivilen Nutzer immer stärker berücksichtigt. Zum anderen wird derzeit das neue Satellitennavigationssystem GALILEO entwickelt, das nicht einer militärischen Kontrolle unterliegt. Des Weiteren soll auch das russische GLONASS-System in den nächsten Jahren wieder volle Operationsfähigkeit aufweisen, es spielt im Rahmen dieser Arbeit jedoch keine Rolle – es wurde bereits von ROßBACH [2000] am Institut untersucht.

Dieser Abschnitt soll daher die zu erwartenden Neuerungen im Bereich der Satellitennavigation bzgl. GPS und GALILEO zusammenfassen und insbesondere die Aspekte, die für die präzise Positionierung von Interesse sind, herausarbeiten. Die dazugehörigen Auswertekonzepte werden hingegen in gesonderten Kapiteln dargestellt – Kapitel 4 für Referenzstationen sowie Kapitel 5 für die Rover-Positionierung.

2.1 GPS Modernisierung

Das US-amerikanische Satellitennavigationssystem GPS erfährt jetzt und in Zukunft umfangreiche Modernisierungen sowohl im Weltraum- und Bodensegment als auch daraus folgend im Nutzersegment. In dem neuen Strategiepapier des US-Präsidenten George W. Bush vom 8. Dezember 2004 zur Weltraumpolitik – insbesondere der Satellitennavigation (U.S. Space-Based Positioning, Navigation and Timing Policy, US-POLICY [2004]) – wird zum einen deutlich gemacht, dass die USA die militärische und wirtschaftliche Dominanz im Bereich der Satellitennavigation „zum Schutz der nationalen Sicherheit“ beibehalten wollen. Die USA verpflichten sich aber auch, zu GPS weltweit freien Zugang ohne direkte Gebühren zu gewähren. Außerdem wird Interoperabilität und Kompatibilität mit anderen PNT- (Positioning, Navigation, Timing) Diensten angestrebt. Schließlich verpflichten sich die USA auch zu fortgesetzten technologischen Verbesserungen des GPS-Systems (GPS Modernization Program), auf die im Folgenden näher eingegangen wird.



Block II/IIR

- Basic GPS
- Standard Service (16-24m SEP)
 - Single frequency (L1)
 - Coarse acquisition (C/A) code navigation
 - Precise Service (16m SEP)
 - Y-Code (L1Y & L2Y)
 - Y-Code navigation

Block IIR-M, IIF

- IIR-M: IIA/IIR capabilities plus
- 2nd civil signal (L2C)
 - M-Code (L1M & L2M)
- IIF: IIR-M capability plus
- 3rd civil signal (L5)
 - Anti-jam flex power

Block III

- Backward compatibility
- 4th civil signal (L1C)
- Increased accuracy
- Increased anti-jam power
- Assured availability
- Increased security
- System survivability

Abbildung 2-1: Schritte der GPS-Modernisierung: links - Entwicklung bis heute, Mitte - im Jahr 2005 begonnene Modernisierung, rechts - Modernisierung in der fernerer Zukunft, aus NEILAN [2006]

Derzeit (Februar 2008) befinden sich 31 operationelle Satelliten der 2. Generation (IIA/IIR/IIR-M) im Orbit; mit dem Satelliten Nr. 15, der über 16(!) Jahre in Betrieb war, wurde am 14. März 2007 der letzte Satellit der Generation II außer Dienst gestellt. Die Satelliten senden den C/A-Kode auf der $L1$ -Frequenz (1575,42 MHz) sowie den verschlüsselten P(Y)-Kode auf der $L1$ - und $L2$ -Frequenz (1227,6 MHz) aus.

Mit dem Start des ersten GPS-Satelliten des Typs IIR-M, gebaut von Lockheed Martin, am 25. September 2005 begann die erste Phase der GPS-Modernisierung (GIBBONS [2006]):

- Ausstrahlung des zivilen C/A-Kodes auch auf der $L2$ -Frequenz ($L2C$)
- Ausstrahlung des neuen militärischen M-Kodes auf der $L1$ - und $L2$ -Frequenz

Bisher wurden vier weitere Block IIR-M Satelliten am 25. September 2006, 17. November 2006, 17. Oktober 2007 sowie 20. Dezember 2007 gestartet. Nach Angaben des National Space-Based PNT Executive Committee (<http://pnt.gov>) ist der Start drei weiterer Block IIR-M Satelliten geplant.

Die nächste Phase der GPS-Modernisierung wird mit dem Start der Block IIF Satelliten erfolgen, der zurzeit für das Jahr 2008 anberaumt ist. Diese von Boeing gebauten Satelliten werden ein drittes ziviles Signal auf der $L5$ -Frequenz (1176,45 MHz) ausstrahlen.

Es ist geplant, das zweite zivile Signal $L2C$ ab dem Jahr 2013 und das dritte zivile Signal ab dem Jahr 2014 in voller Satellitenausbaustufe verfügbar zu haben.

In fernerer Zukunft – frühestens im Jahr 2013 – wird mit den verbesserten, aber auch teureren Block III Satelliten ein viertes ziviles Signal auf der $L1$ -Frequenz zur Verfügung stehen, das ähnlich oder identisch mit dem offenen Signal des europäischen Satellitennavigationsystems GALILEO sein wird.

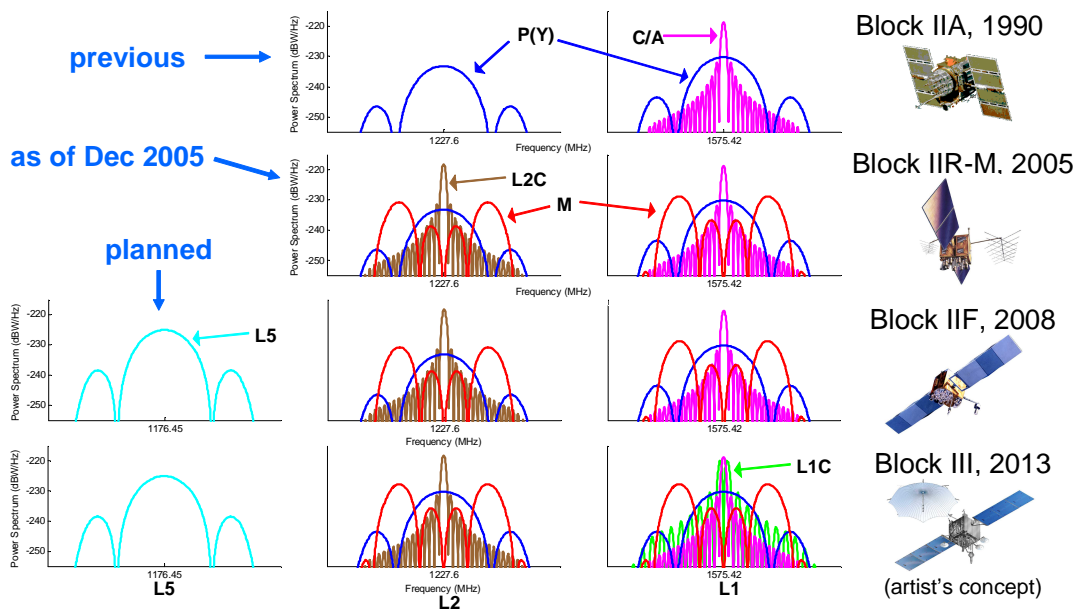


Abbildung 2-2: GPS-Signale im Zuge der Modernisierung; violett ($L1$) und braun ($L2$): ziviler C/A-Kode, dunkelblau: militärischer P(Y)-Kode, rot: militärischer M-Kode, türkis: drittes ziviles Signal ($L5$), hellgrün: viertes ziviles Signal ($L1C$); aus CREWS [2007]

Einen Überblick über alle derzeit nutzbaren GPS-Satelliten sind Tabelle 2-1 zu entnehmen.

Das neue zivile Signal auf $L2$ ($L2C$) besteht nach FONTANA ET AL. [2001] aus zwei Sub-Kodes mit jeweils einer Chippingrate von 511,5 kbps, so dass sich eine Gesamt-Chippingrate von 1,023 Mbps ergibt:

- CM – mittellanger *L2C* Kode mit einer Länge von 10.230 Chips bzw. 20 ms, zusätzlich werden Navigationsdaten mit 25 bps aufmoduliert
- CL – langer *L2C* Kode mit einer Länge von 767.250 Chips bzw. 1,5 s, ohne Aufmodulation von Daten.

Satellite		Freq.	
PRN/SVN	Plane	Std #	Block
01/32	F6	Cs3	IIA
02/61	D1	Rb3	IIR
03/33	C2	Cs4	IIA
04/34	D4	Rb1	IIA
05/35	B5	Rb1	IIA
06/36	C1	Rb1	IIA
07/49		Rb?	IIR-M6
08/38	A3	Cs3	IIA
09/39	A1	Cs4	IIA
10/40	E3	Cs4	IIA
11/46	D2	Rb1	IIR
12/58	B4	Rb3	IIR-M3
13/43	F3	Rb1	IIR
14/41	F1	Rb1	IIR
15/55	F2	Rb3	IIR-M4
16/56	B1	Rb3	IIR
17/53	C4	Rb3	IIR-M1
18/54	E4	Rb1	IIR
19/59	C3	Rb3	IIR
20/51	E1	Rb1	IIR
21/45	D3	Rb3	IIR
22/47	E2	Rb3	IIR
23/60	F4	Rb2	IIR
24/24	D5	Cs4	IIA
25/25	A5	Rb1	IIA
26/26	F2	Rb1	IIA
27/27	A4	Cs4	IIA
28/44	B3	Rb2	IIR
29/57	C1	Rb3	IIR-M5
30/30	B2	Cs3	IIA
31/52	A2	Rb3	IIR-M2
32/23	E5	Rb2	IIA

Start für 13. März 2008 geplant

Tabelle 2-1: Aktueller System-Status von GPS (Stand 22.02.2008); Quelle: <http://earth-info.nima.mil/GandG/sathtml/satinfo.html>

Mit dem zweiten zivil nutzbaren Signal wird zum einen der zivile Nutzer den ionosphärischen Einfluss korrigieren können, zum anderen werden eine einfachere Akquisition und weniger Leistungsverluste beim Empfang erwartet.

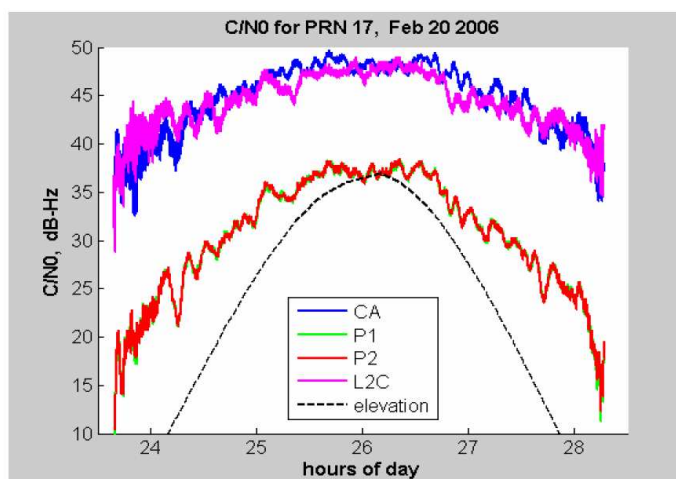


Abbildung 2-3: Signal-Rausch-Verhältnis C/N_0 für *L2C*, *C/A*, *P1* und *P2* Signale nach SIMSKY ET AL. [2006]

SIMSKY ET AL. [2006] haben erste Tests mit dem *L2C*-Signal des ersten Block IIR-M Satelliten (PRN 17) durchgeführt. Mit dem Empfänger PolaRx2C von Septentrio wurden *C/A*-, *P1*-, *P2*- und *L2C*-Messungen durchgeführt, wobei für die Pseudostrecken sowohl der *CL*- als auch der *CM*-Kode getrackt wurde, für die Trägerphasen hingegen nur der

datenfreie CL-Kode. Die Signalstärke von $L2C$ ist um 2,3 dB kleiner als die des $L1 C/A$ -Kodes, so dass trotz der verbesserten Struktur des $L2C$ -Kodes ein schlechteres Signal-Rauschverhältnis C/N_0 erwartet wird. Jedoch kann man Abbildung 2-3 entnehmen, dass das C/N_0 von $L2C$ und C/A -Kode annähernd gleich ist (der Unterschied C/N_0 ($L2C$ - C/N_0 (C/A)) variiert zwischen -0,4 dB und +2 dB).

Auch im Bereich des Bodensegmentes erfährt GPS eine Modernisierung. Ursprünglich gab es lediglich die Master Control Station in Colorado Springs sowie vier weitere Monitorstationen der US-Luftstreitkräfte (USAF) auf Hawaii, Ascension Islands, Diego Garcia und Kwajalein. In Cape Canaveral wurde 2001 eine weitere Monitorstation hinzugefügt (MISRA UND ENGE [2001]).

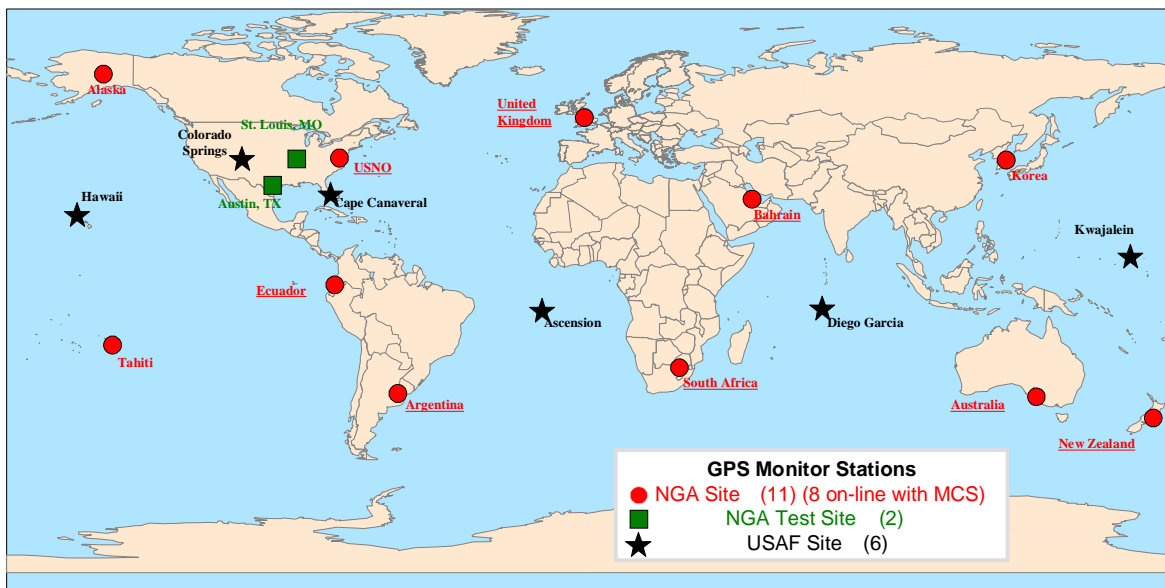


Abbildung 2-4: Übersicht über die derzeitigen und zukünftigen GPS-Monitorstationen: Master Control Station (MCS) und Monitorstationen der U.S. Air Force sind mit einem schwarzen Stern gekennzeichnet, NGA-Stationen mit einem roten Punkt (unterstrichene Stationen haben eine real-time Datenverbindung mit der MCS) und NGA Test-Stationen (grünes Quadrat), aus CRANE [2007]

Im Zuge einer Initiative des US-amerikanischen Verteidigungsministeriums (DoD's GPS Accuracy Improvement Initiative AII) wurden und werden Monitorstationen der National Geospatial Intelligence Agency (NGA, früher NIMA) mit in das Bodensegment eingebunden (HAY [2000]). Derzeit (Anfang 2007) werden zusätzlich Daten von den Stationen Washington, Ecuador, Argentinien, England, Bahrain, Südafrika, Australien und Neuseeland für die Orbit- und Uhrenparameterbestimmung verwendet. Mit den zusätzlichen Monitorstationen und zahlreichen Modell- und Prozessierungsverbesserungen im Rahmen der AII konnten in den letzten Jahren nach und nach die Broadcast-Orbits und damit auch der SIS-URE um ca. 10% verbessert werden (CREEL ET AL. [2006]).

Die weiteren drei NGA-Stationen Alaska, Tahiti und Südkorea werden nach und nach ebenfalls zu GPS-Monitorstationen.

Durch die Zunahme an Monitorstationen ist auch eine bessere Überwachung der Satelliten (Integrität) gewährleistet. Abbildung 2-5 stellt dar, von wie vielen Monitorstationen ein GPS-Satellit auf der Erde beobachtet werden kann – und zwar in der oberen Abbildung mit insgesamt sechs, in der mittleren Abbildung mit insgesamt zwölf und in der

unteren Abbildung mit insgesamt 17 verfügbaren Monitorstationen.

So gab es vor der Einbindung von NGA-Stationen große Gebiete, in denen GPS-Satelliten nur von maximal einer Monitorstation überwacht wurden. Dahingegen wird mit insgesamt 17 Monitorstationen ein GPS-Satellit von mindestens drei Monitorstationen verfolgt werden können.

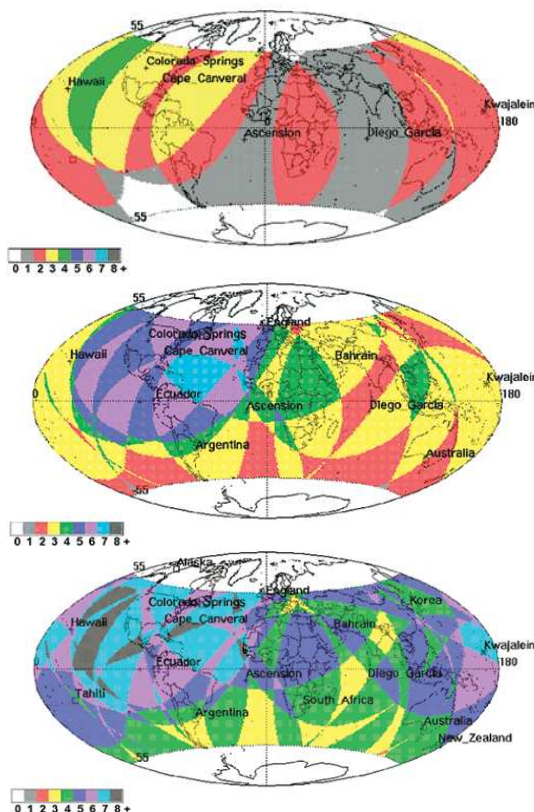


Abbildung 2-5: Anzahl der Monitorstationen, die einen GPS-Satelliten beobachten können, bei insgesamt sechs (oben), zwölf (Mitte) bzw. 17 (unten) verfügbaren Monitorstationen, aus CREEL ET AL. [2006]

2.2 GALILEO

Das europäische Satellitennavigationssystem GALILEO wird gemeinsam von der Europäischen Union (EU) und der europäischen Weltraumorganisation ESA entwickelt, weitere Staaten wie Indien, China, Israel, Ukraine, Südkorea usw. beteiligen sich ebenfalls am Aufbau von GALILEO.

Nach BENEDICTO ET AL. [2000] wird GALILEO als Walker 27/3/1 Konstellation mit 30 MEO Satelliten (Medium Earth Orbit) aufgebaut werden, d.h. 27 plus drei Ersatzsatelliten verteilt auf drei Bahnebenen, s. Abbildung 2-6. Die Bahnhöhe beträgt 23.260 km und die Neigung der Bahnebene 56°. Das GALILEO Bodensegment wird nach WEBER ET AL. [2001] einmal aus dem Kontrollsegment für den Betrieb und die Bahn- und Zeitbestimmung (Ground Control Segment GCS) und zum anderen aus dem System zur Überwachung der Integrität (Integrity Determination System IDS) bestehen. Das GCS wird sich aus ca. 18-20 Monitorstationen, 9 Up-Link Stationen, 5 TTC-Stationen sowie zwei Kontrollzentren zusammensetzen.

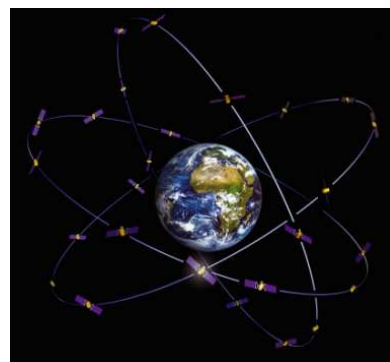


Abbildung 2-6: GALILEO Raumsegment, Quelle: ESA

Der Stand der Signaldefinition von Juni 2004, wie er durch die EU und die USA vereinbart wurde (US-EC [2004], GALILEO [2004a,b]), ist in Abbildung 2-7 und Tabelle 2-2 schematisch dargestellt. GALILEO wird im Prinzip Signale in drei Frequenzbändern ausstrahlen, und zwar im unteren L-Band *E5a* (Zentralfrequenz ist identisch mit GPS *L5*) und *E5b* mit jeweils 24 MHz Bandbreite bzw. der gesamte *E5ab*-Bereich mit einer Bandbreite von ca. 90 MHz, im mittleren L-Band *E6* mit insgesamt 40 MHz Bandbreite sowie im oberen L-Band *L1* (ebenfalls identisch mit GPS *L1*) mit 32,7 MHz Bandbreite (EISSFELLER ET AL. [2007a]). Hierbei ist anzumerken, dass Ende 2006 von offizieller Seite die Terminologie von „GALILEO *L1*“ zu Gunsten der Bezeichnung „GALILEO *E1*“ abgelöst wurde.

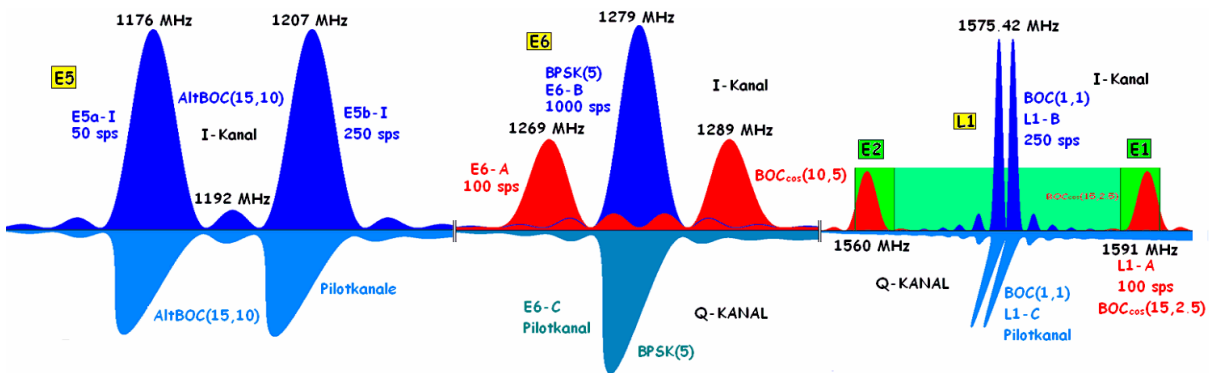


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Signaldefinition von GALILEO, aus EISSFELLER ET AL. [2007a]

Für die Signalstruktur auf *E1* deutet sich allerdings noch eine Änderung an. Zwar haben sich die EU und die USA am 26. Juni 2004 auf dieselbe Modulation für GPS *L1C* sowie GALILEO *E1* geeinigt, sich jedoch die Möglichkeit offen gehalten, eine Optimierung, solange diese auf BOC(1;1) basiert und alle weiteren Kriterien des Agreements erfüllt, implementieren zu können. Im März 2006 haben die Signalexperten eine Alternative zu BOC(1;1) identifiziert (US-EU [2006]), nämlich MBOC(6;1;1/11) als eine viel versprechende Lösung für GALILEO *E1* OS und GPS *L1C*. Nach HEIN ET AL. [2006] erhält die Spektralleistungsdichte der optimierten Modulation die Kompatibilität mit BOC(1;1) Empfängern, während zusätzliche Signalkomponenten in höheren Frequenzen eine höhere Performance erlauben (z.B. zur Unterdrückung von Mehrwege-Fehlern). Somit sieht der derzeitige Stand der GALILEO Signaldefinition folgendermaßen aus:

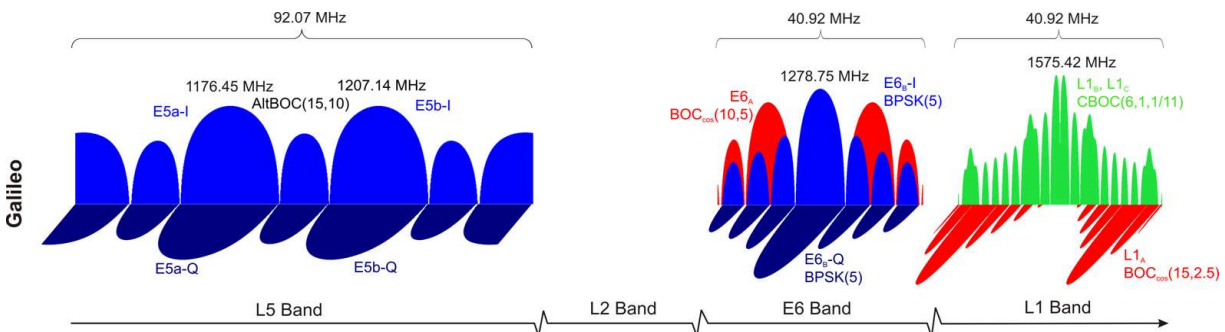


Abbildung 2-8: Schematische Darstellung der Signaldefinition von GALILEO, Stand Juli 2007, aus EISSFELLER ET AL. [2007b]

Alle weiteren Details bezüglich der Dienste, Chip- und Datenraten sind in Tabelle 2-2 zusammengefasst.

Signal	Frequenz [MHz]		Service	Modulation	Chiprate [Mcps]	Datenrate [sps]
1	<i>E5a</i>	1176,45 (115)	OS	AltBOC(15;10)	10,23	50
2	<i>E5a</i>	1176,45 (115)	OS	AltBOC(15;10)	10,23	---
3	<i>E5b</i>	1207,14 (118)	OS/SoL/CS	AltBOC(15;10)	10,23	250
4	<i>E5b</i>	1207,14 (118)	OS/SoL/CS	AltBOC(15;10)	10,23	---
5	<i>E1_B</i>	1575,42 (154)	OS/SoL/CS	CBOC(6;1;1/11)	1,023	250
6	<i>E1_C</i>	1575,42 (154)	OS/SoL/CS	CBOC(6;1;1/11)	1,023	---
7	<i>E6</i>	1278,75 (125)	CS	BPSK(5)	5,115	1000
8	<i>E6</i>	1278,75 (125)	CS	BPSK(5)	5,115	---
9	<i>E6</i>	1278,75 (125)	PRS	BOC(10;5)	5,115	100
10	<i>E1_A</i>	1575,42 (154)	PRS	BOC(15;2,5)	2,5575	100

Tabelle 2-2: Frequenzen und Modulation der GALILEO-Signale; OS: Open Service; SoL: Safety of Life; CS: Commercial Service; PRS: Public Regulated Service; Mcps: Megachips per second; sps: symbols per second

Der offene Dienst (Open Service OS) soll auf *E1* und *E5a/E5b/E5ab* frei und kostenlos empfangbar sein. Der kommerzielle Dienst (Commercial Service CS) hingegen wird kostenpflichtig und verschlüsselt sein und mit einer hohen Datenrate von derzeit geplanten 1000 symbols/sec versehen sein. Der sichere Dienst (Safety of Life SoL) wird gegenüber dem offenen Dienst darin erweitert sein, dass rechtzeitige Warnungen im Falle von Genauigkeitseinschränkungen oder Ausfall von Satelliten gegeben werden. Der regulierte oder staatliche Dienst (Public Regulated Service PRS) wird ausschließlich hoheitlichen Kreisen wie Polizei, Küstenwache oder Geheimdienst, aber u.U. auch dem Militär zur Verfügung stehen.

Mit dem *E5ab* liegt ein besonders breitbandig abgestrahltes Signal vor, was einen geringeren Mehrwege-Fehler zur Folge hat. Zukünftige Empfänger werden entweder die einzelnen Sub-Carrier *E5a* und *E5b* tracken können, aber auch das gesamte *E5ab* Signal.

Für alle Modulationen (außer der für den regulierten Dienst) ist ein datenfreies und ein datenbehaftetes Signal vorgesehen; dies wird durch den I-Kanal und den um 90° gedrehten Q-Kanal – Pilotkanal – bzw. durch Interplexmodulation bei *E1_B* und *E1_C* realisiert. Das datenfreie Signal bietet sich für ein robusteres Tracken der Trägerphasen an, da der Schwellwert für das Auftreten von Cycle Slips etwas höher liegt.

2.2.1 Vergleich mit GPS

Bei der schnellen präzisen Positionierung ist die Genauigkeit der Streckenmessung von großer Bedeutung. Die Mehrdeutigkeitsbestimmung allein aus Trägerphasen dauert lange, da die Satellitenkonstellation sich nur langsam verändert, was aber für die Dekorrelation der Mehrdeutigkeitsparameter erforderlich ist. Die Streckenmessung ist hingegen frei von Mehrdeutigkeiten und wird deshalb für eine schnelle präzise Positionierung benötigt. Daher wird im Folgenden auf die Performance von Kode-Messungen sowohl für GALILEO als auch für GPS etwas näher eingegangen.

Die Eigenschaften der Signalstrukturen, die auf die GALILEO Trägerwellen aufmoduliert werden, erlauben die Ermittlung von Kodestrecken auf einem bisher nicht erreichten, sehr niedrigen Rauschniveau, wobei für GALILEO *E1* noch nicht die MBOC-Modulation berücksichtigt wurde, sondern die BOC(1;1)-Modulation. Tabelle 2-3 und

Abbildung 2-9 stellen das Kode-Rauschen für die gegenwärtigen und zukünftigen GPS- und GALILEO-Signale gegenüber. Hierbei wird allerdings nur das Empfänger-Rauschen dargestellt, alle anderen externen Effekte wie z.B. die atmosphärische Refraktion bleiben unberücksichtigt. Des Weiteren handelt es sich bei einem C/N_0 -Verhältnis von 45 dB Hz um eher optimale Bedingungen, Beobachtungen bei einer niedrigen Elevation weisen ein höheres Rauschen auf.

Signal	Modulation	Leistung [dB·W]	Empfänger-Bandbreite [MHz]	Rauschen [m]
GPS C/A L1	BPSK(1)	-160	24	0,24
GPS C/A L1	BPSK(1)	-160	8	0,41
GALILEO E1	BOC(1;1)	-155	24	0,14
GALILEO E1	BOC(1;1)	-155	8	0,23
GALILEO E6	BPSK(5)	-155	24	0,11
GPS L5	BPSK(10)	-154	24	0,08
E5a oder E5b	AltBOC(15;10)	-155	24	0,02

Tabelle 2-3: Rauschen der Kode-Strecken für GPS und GALILEO Empfänger bei einem angenommenen Träger-zu-Rauschverhältnis (C/N_0) von einheitlich 45 dB Hz, aus EISSFELLER ET AL. [2007a]

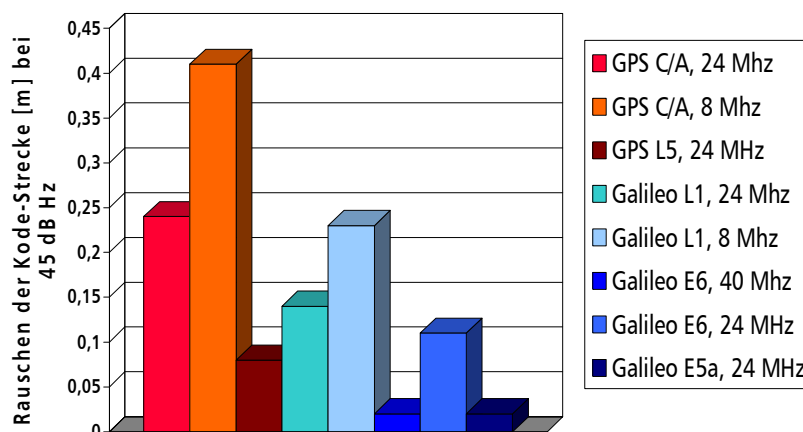


Abbildung 2-9: Grafische Veranschaulichung des Rauschens der Kode-Strecken für ausgewählte GPS und GALILEO Signale; eine Bandbreite zukünftiger Empfänger von 24 MHz gilt als realistisch, aus EISSFELLER ET AL. [2007a]

Die deutliche Verringerung des Rauschniveaus wird gewiss ihre Auswirkung auf kinematische Anwendungen haben, allerdings werden sich Mehrwege-Effekte weiterhin störend bemerkbar machen und die Genauigkeit der Streckenmessung herabsetzen. Der Einfluss dieser Mehrwege-Signale ist hauptsächlich abhängig von der Modulationsart, der Bandbreite des empfangenen Signals sowie der Eigenschaften der Empfangsumgebung (Anzahl und Dämpfung der auftretenden Umwegsignale, Entfernung der potenziellen Reflektoren von der Antenne). Jedoch kann es mittlerweile als Standard betrachtet werden, dass Empfänger durch entsprechende Signalverarbeitungsalgorithmen, z.B. durch die „enge Korrelation“, diese Fehlereinflüsse deutlich reduzieren können (EISSFELLER ET AL. [2007a]).

Die maximalen und durchschnittlich zu erwartenden Mehrwege-Fehler sind in Tabelle 2-4 zusammengefasst. Hierbei wurden verschiedene typische Mehrwege-Umgebungen (open, rural, suburban, urban) berücksichtigt. Man erkennt, dass der Mehrwege-Fehler sowohl bei GPS als auch bei GALILEO weitaus größer als das Empfänger-Rauschen sein kann, wobei GALILEO grundsätzlich ein etwas günstigeres

Signal	Modulation	Bandbreite [MHz]	Max. Fehler [m]	Repräsentative Mittelwerte [m]			
				Offen	Ländlich	Vorstädtisch	Städtisch
GPS C/A L1	BPSK(1)	8	12,0	0,24	2,04	0,87	4,85
GALILEO E1	BOC(1;1)	8	12,0	0,24	2,04	0,87	4,85
GPS C/A L1	BPSK(1)	24	6,9	0,20	1,39	0,59	3,35
GALILEO E1	BOC(1;1)	24	6,9	0,20	1,39	0,59	3,35
GALILEO E1	MBOC(6;1;1/11)	24	5,2	0,17	0,85	0,36	2,04
GALILEO E6	BPSK(5)	24	4,00	0,14	0,80	0,34	1,97
GPS L5	BPSK(10)	24	4,51	0,15	0,54	0,23	1,42
E5a oder E5b	AltBOC(15;10)	24	1,62	0,04	0,11	0,05	0,30
E5ab	AltBOC(15;10)	51	1,62	0,04	0,11	0,05	0,30

Tabella 2-4: Maximale (Einhüllende) und repräsentative mittlere Mehrwege-Fehler für GPS und GALILEO Kode-Beobachtungen bei Verwendung „enger“ Korrelation zur Mehrweg-Reduktion, aus EISSFELLER ET AL. [2007a]

Verhalten aufweist. Die geringsten Mehrwege-Fehler sind bei der Verwendung des GALILEO E5 Signals zu erwarten, wobei die Verwendung des schmalbandigeren E5a oder E5b Subcarriers nach Untersuchungen am Institut gegenüber dem gesamten E5ab Signal keine Verbesserungen erwarten lässt (Quelle: pers. Kontakt mit M. Irsigler, IfEN GmbH).

2.2.2 Annahmen

Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit müssen folgende Annahmen getroffen werden. Der offene Dienst von GALILEO wird sicherlich aktiv genutzt werden, d.h. man kann die Signale auf E1 und E5a/E5b verwenden. Die Nutzung des kommerziellen Dienstes ist fraglich, da zusätzliche Kosten zu den SAPOS[®]-Entgelten wahrscheinlich nicht akzeptiert werden. Trotzdem wird aber teilweise das E6 Signal berücksichtigt, z.B. für die Untersuchung der Positionierung mit Signalen aus drei und mehr Frequenzbereichen.

2.3 GLONASS

Nach GIBBONS [2006] und BARTENEV ET AL. [2006] hat Russland das Bestreben, GLONASS wieder voll auszubauen. Im Jahr 2001 wurde von Präsident Putin initiiert, GLONASS in den Jahren 2002-2011 wiederaufzubauen und zu modernisieren. Am 25. Dezember 2005 und 2006 wurden jeweils drei neue GLONASS-Satelliten gestartet. Das Ziel war ursprünglich, eine minimale Ausbaustufe von 18 Satelliten im Jahr 2008 und die volle Ausbaustufe in 2010-2011 zu erreichen. Doch nach dem Satellitenstart im Dezember 2005 erklärte Präsident Putin, GLONASS schon bis zum Jahr 2009 wieder voll ausbauen zu wollen.

Eines der Hauptprobleme von GLONASS ist jedoch die Lebensdauer seiner Satelliten. Zur Zeit beträgt diese durchschnittlich 4,5 Jahre – halb so viel wie die der GPS-Satelliten. Die modernisierten GLONASS-M Satelliten sollen auf eine Lebensdauer von 7 Jahren ausgelegt sein. Trotzdem sind im Herbst 2007 (4. Oktober 2007) nur 9 von insgesamt 17 im Orbit befindlichen Satelliten aktiv (im Gegensatz zu bspw. immerhin 11 aktiven Satelliten am 24. Juli 2007); einer der drei im Dezember 2006 gestarteten Satelliten ist noch immer nicht aktiv, s. Tabelle 2-5.

Ein weiteres Problem von GLONASS ist seine schlechtere Performance, so weisen die Ephemeriden von GPS eine Genauigkeit von ca. 1 m auf, die von GLONASS ca. 7-8 m (GIBBONS [2006]). Diese Probleme sollen durch das Modernisierungsprogramm abgefangen werden, so soll die Anzahl der Bodenstationen um 3-15 Stationen erweitert werden. Die Uhren der GLONASS-M Satelliten sollen um den Faktor 5 stabiler sein. Außerdem soll mit der neuen Generation von GLONASS-K Satelliten, die schon im Jahr 2008 ge-

Plane	Slot	Frequency Channel	GLONASS Number	Cosmos Number	Launch date	Input date	Outage date	Active life (months)	Notes
I	1	07	796	2411	26.12.04	06.02.05		29.3	
	2	01	794	2402	10.12.03	02.02.04	19.04.07	38.3	Decommissioning Phase
	3	12	789	2381	01.12.01	04.01.02	25.08.07	61.0	Temporarily is switched off
	4	06	795	2403	10.12.03	29.01.04		44.0	
	5	07	711	2382	01.12.01	13.02.03	09.07.06	36.1	Decommissioning Phase
	6	01	701	2404	10.12.03	08.12.04		28.6	
	7	05	712	2413	26.12.04	07.10.05		21.1	
	8	06	797	2412	26.12.04	06.02.05		30.6	
II	10	04	717	2426	25.12.06	03.04.07		5.5	
	14	04	715	2424	25.12.06	03.04.07		6.0	
	15	00	716	2425	25.12.06				Commissioning Phase
	18	10	783	2374	13.10.00	05.01.01	25.05.07	66.5	Decommissioning Phase
III	19	03	798	2417	25.12.05	22.01.06	09.07.07	17.4	Temporarily is switched off
	21	08	792	2395	25.12.02	31.01.03		52.1	
	22	10	791	2394	25.12.02	21.01.03	07.02.07	46.5	Decommissioning Phase
	23	03	714	2419	25.12.05	31.08.06		11.5	
	24	02	713	2418	25.12.05	31.08.06	08.09.07	10.6	Temporarily is switched off

Tabelle 2-5: Aktueller System-Status von GLONASS am 4. Oktober 2007, Quelle:
<http://www.glonass-ianc.rsa.ru>

startet werden sollen, zusätzlich ein drittes Signal im 1198-1208 MHz Band inkl. Integritätssignal und differentieller Korrekturdatenausstrahlung zur Verfügung stehen.

Trotzdem ist die Entwicklung von GLONASS unsicher, vor allem, ob die Lebensdauer der Satelliten wirklich höher sein wird. Des Weiteren bleibt das Problem des FDMA (Frequency Division Multiple Access), d.h. jeder Satellit sendet auf einer eigenen Frequenz, somit sind bei der Bildung von doppelten Differenzen keine ganzzahligen Mehrdeutigkeiten mehr generierbar, so dass GLONASS für die schnelle präzise Positionierung nur sehr eingeschränkt nutzbar ist. Aus diesen Gründen wird GLONASS nicht weiter in diese Arbeit mit einbezogen.

2.4 Linearkombinationen

Ein fundamentales Daten-Verarbeitungsprinzip der verwendeten Auswerte-Software „NEREUS“ und „SEMIKA“ (s. Kapitel 4 und 5) ist die Bildung von Linearkombinationen, deshalb soll an dieser Stelle ein genauerer Blick darauf geworfen werden. Es wird jedoch an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass im Rahmen der für diese Arbeit vorgenommenen Modifikationen auch die Verarbeitung der originären Beobachtungen ($L1$, $L2$, ...) integriert wurde, s. ANSA-Methode zur Mehrdeutigkeitslösung in Kapitel 5.2.5.

Durch die Vielzahl der künftig verfügbaren Signale ergeben sich nunmehr vielfältige Kombinationsmöglichkeiten. Die Kombinationen werden hauptsächlich durch ihren Ionosphäreneinfluss, ihre Wellenlänge sowie ihr Rauschniveau charakterisiert. Linearkombinationen mit einem abgeschwächten Ionosphäreneinfluss weisen bei einem moderat verstärkten Rauschen eine eher kleine Wellenlänge auf. Linearkombinationen mit einer größeren Wellenlänge, wie z.B. der „Wide Lane“, weisen hingegen ein höheres Rauschniveau und einen verstärkten Ionosphäreneinfluss auf. Linearkombinationen mit einem besonders niedrigen Rauschniveau, wie z.B. die „Narrow Lane“, zeichnen sich hingegen durch eine reduzierte Wellenlänge aus.

Auf allen Frequenzen werden sowohl direkte Kode- als auch Trägerphasenmessungen vorliegen; genauer gesagt sind bei GALILEO je nachdem, ob man den I-Kanal oder den datenfreien Q-Kanal verwendet, verschiedene Trägerphasenmessungen ableitbar. Da die

datenfreien Messungen aber ein günstigeres S/N_{σ} -Verhältnis haben, wird in dieser Arbeit angenommen, dass nur diese verwendet werden. Für die Trägerphasenmessgenauigkeit wird im Folgenden zur leichteren Vergleichbarkeit einheitlich eine Standardabweichung von 1 mm angenommen.

2.4.1 Linearkombinationen aus zwei Signalen

Zwei-Frequenz-Empfänger werden in der Zukunft keineswegs Auslaufmodelle sein, da Empfänger, die Messungen aus drei oder mehr Frequenzbereichen verarbeiten können, vermutlich recht teuer sein werden. Noch heutzutage sind geodätische 2-Frequenz-Empfänger bereits fast dreimal so teuer wie 1-Frequenz-Systeme. Auf dieser Basis kann extrapoliert werden, dass 3-Frequenz-Empfänger wiederum in ihren Kosten deutlich über jenen von 2-Frequenz-Systemen liegen werden. Aus finanziellen Gründen werden daher 2-Frequenzsysteme weiterhin eine große Marktrelevanz haben. Trotzdem gibt es bei dieser Gruppe von Empfängern viele Vorteile durch die GPS-Modernisierung und die gleichzeitige GALILEO-Nutzung, denkt man nur an die gemeinsamen Frequenzen $L1/E1$ sowie $L5/E5a$. Deshalb werden in dieser Arbeit auch 2-Frequenz-Systeme berücksichtigt und es wird gezeigt werden können, dass damit ebenfalls eine sehr gute Performance erzielt werden kann.

2.4.1.1 Theoretische Grundlagen

Aus den Kode- bzw. Trägerphasenmessungen zweier Signale auf zwei Frequenzen lassen sich Linearkombinationen (LK) mit folgenden Eigenschaften bilden.

Frequenz der Linearkombination:

$$f_{LK} = a_1 \cdot f_1 - a_2 \cdot f_2 \quad (2-1)$$

Wellenlänge der Linearkombination:

$$\lambda_{LK} = \frac{c}{a_1 \cdot f_1 - a_2 \cdot f_2} = \frac{c}{f_{LK}} = \frac{1}{\frac{a_1}{\lambda_1} - \frac{a_2}{\lambda_2}} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{a_1 \cdot \lambda_2 - a_2 \cdot \lambda_1} \quad [m] \quad (2-2)$$

Kodebeobachtung der Linearkombination:

$$\frac{\rho_{LK}}{\lambda_{LK}} = a_1 \frac{\rho_1}{\lambda_1} - a_2 \frac{\rho_2}{\lambda_2} \quad (2-3)$$

Trägerphasenbeobachtung der Linearkombination:

$$\varphi_{LK} = a_1 \cdot \varphi_1 - a_2 \cdot \varphi_2 \quad [cyc] \quad (2-4)$$

Mehrdeutigkeiten der Linearkombination:

$$N_{LK} = a_1 \cdot N_1 - a_2 \cdot N_2 \quad (2-5)$$

Der Verstärkungsfaktor für die Ionosphäre beschreibt den Einfluss des ionosphärischen Fehlers 1. Ordnung (LEINEN [1997]):

$$V_{ION} = \frac{a_1 \cdot f_2 - a_2 \cdot f_1}{f_{LK}} \quad (2-6)$$

Verhältnis ionosphärischer Einfluss auf die Linearkombination zu ionosphärischem Einfluss auf einer Grundfrequenz ($L1$):

$$\frac{ION_{LK}[m]}{ION_{L1}[m]} = \frac{f_1}{f_2} \cdot |V_{ION}| \quad (2-7)$$

Standardabweichung der undifferenzierten Linearkombination (Phase):

$$\sigma_{\varphi_{LK}} = \sqrt{(a_1 \cdot \sigma_{\varphi_{L1}})^2 + (a_2 \cdot \sigma_{\varphi_{L2}})^2} \quad \sigma_{\varphi_{L1}} [\text{cyc}] \quad (2-8)$$

An dieser Stelle sei noch erwähnt, wie nach DACH ET AL. [2007] die Mehrdeutigkeiten der Wide-Lane sich aus der Kombination von Kode- und Trägerphasenmessungen bestimmen lassen. Diese Schätzung von N_W ist frei von Einflüssen der Troposphäre, Ionosphäre, geometrischen Unsicherheiten (Koordinaten) und Uhrfehlern, die aber bei der Bildung von doppelten Differenzen entfallen.

$$N_W = -\frac{\frac{f_1 \cdot \varphi_1 - f_2 \cdot \varphi_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 \cdot \rho_1 + f_2 \cdot \rho_2}{f_1 + f_2}}{\lambda_W} \quad \begin{array}{l} \rho_{1,2} \text{ in [m]} \\ \varphi_{1,2} \text{ in [m]} \end{array} \quad (2-9)$$

$$N_W = \frac{f_1 \cdot \rho_1 + f_2 \cdot \rho_2}{\lambda_W \cdot (f_1 + f_2)} - (\varphi_1 - \varphi_2) \quad \begin{array}{l} \rho_{1,2} \text{ in [m]} \\ \varphi_{1,2} \text{ in [cyc]} \end{array} \quad (2-10)$$

2.4.1.2 Linearkombinationen für GPS

Aus den Kode- bzw. Trägerphasenmessungen der drei Frequenzen für ein modernisiertes GPS lassen sich folgende Linearkombinationen (LK) bilden: zwischen $L1$ und $L2$, $L1$ und $L5$ und $L2$ und $L5$. In Tabelle 2-6 sind ausgewählte Linearkombinationen aufgeführt, eine ausführliche Tabelle findet sich im Anhang (Tabelle A-1). Es sind jeweils die Koeffizienten a_1 und a_2 , die Wellenlänge λ_{LK} , der Verstärkungsfaktor V_{ION} , das Verhältnis des Ionosphäreinflusses der Linearkombination zu dem auf der Grundfrequenz $L1$ bzw. $L2$ sowie die Standardabweichung der Linearkombination angegeben.

In jedem Block sind, durch einen Doppelstrich unterteilt, angegeben:

- die Grundsignale,
- die „Wide Lane“, die zwar einen erhöhten Ionosphäreinfluss aufweist, aber aufgrund ihrer vergleichsweise großen Wellenlänge sich gut zur Fixierung der Mehrdeutigkeiten verwenden lässt, sowie die „Narrow Lane“, deren Mehrdeutigkeiten wie die der „Wide Lane“ entweder gerade oder ungerade sein müssen (s. Kap. 4)
- eine oder zwei ionosphärenreduzierte Signale sowie die ionosphärenfreie Linearkombination, die dem geometrischen Residuum (Troposphäre + Orbit) entspricht,
- eine oder zwei geometriereduzierte Signale sowie die geometriefreie Linearkombination, die dem ionosphärischen Residuum entspricht.

Anzumerken sei an dieser Stelle, dass die ionosphärenfreie Linearkombination eine minimale Wellenlänge aufweist, die in der Praxis nicht fixiert werden kann. Aus Gründen der numerischen Stabilität wird daher bei der Verwendung dieser Kombination eine Normalisierung der Faktoren vorgenommen, d.h. $a_1'=1$ und $a_2'=a_2/a_1$, wodurch Fließkommazahlen entstehen und die Ganzzahligkeit der Mehrdeutigkeiten verloren geht.

Signal	a_1	a_2	λ_{LK} [mm]	$ V_{ION} $	$\frac{ION_{LK}[m]}{ION_{L_1(L_2)}[m]}$	$\sigma_{\phi,LK}$ [mm]	$\sigma_{\phi,LK}$ [cyc]
L₁	1	0	190	0,779	1,000	1,0	0,005
L₂	0	-1	244	1,283	1,647	1,0	0,004
L _N	1	-1	107	1,000	1,283	0,7	0,007
L _W	1	1	862	1,000	1,283	5,7	0,007
L _{2;1}	2	1	156	0,457	0,587	1,8	0,011
L _{77;60}	77	60	6	0,000	0,000	3,0	0,473
L _{60;77}	60	77	∞	∞	∞		
L _{2;3}	2	3	564	4,269	5,479	9,1	0,016
L₁	1	0	190	0,747	1,000	1,0	0,005
L₅	0	-1	255	1,339	1,793	1,0	0,004
L _{„N“}	1	-1	109	1,000	1,339	0,7	0,007
L _{Med.}	1	1	751	1,000	1,339	4,9	0,007
L _{2;1}	2	1	152	0,394	0,527	1,7	0,011
L _{154;115}	154	115	3	0,000	0,000	2,6	0,927
L _{115;154}	115	154	∞	∞	∞		
L _{3;4}	3	4	14652	135,5	181,5	326	0,022
L _{1;2}	1	2	386	2,539	3,401	3,6	0,009
L₂	1	0	244	0,958	1,000	1,0	0,004
L₅	0	-1	255	1,043	1,000	1,0	0,004
L _{„N“}	1	-1	125	1,000	1,043	0,7	0,006
L _{XW}	1	1	5861	1,000	1,043	33,2	0,006
L _{2;1}	2	1	234	0,880	0,918	2,1	0,009
L _{24;23}	24	23	125	0,000	0,000	16,6	0,133
L _{23;24}	23	24	∞	∞	∞		
L _{1;2}	1	2	266	1,136	1,186	2,4	0,009

Tabelle 2-6: Ausgewählte Linearkombinationen aus zwei Signalen für GPS

2.4.1.3 Linearkombinationen für GALILEO

In Tabelle 2-7 sind für GALILEO ausgewählte Linearkombinationen aufgeführt, auf eine Auflistung für die Kombination der Signale *E1* und *E5a* wurde verzichtet, da diese mit denen für GPS *L1* und *L5* identisch sind. Eine detaillierte Liste findet sich im Anhang (Tabelle A-2).

Für die in Tabelle 2-6 und Tabelle 2-7 aufgelisteten Linearkombinationen lässt sich generell sagen, dass die „Wide Lane“ sowie die „Narrow Lane“ in Kombination mit der „Wide Lane“ zur Mehrdeutigkeitslösung herangezogen werden kann. Die Gruppe der ionosphärenreduzierten Linearkombinationen werden vor allem bei einer Positionierung über längere Basislinien interessant, wenn das verwendete Ionosphärenmodell zu größeren Restfehlern führt. Jedoch muss man dabei beachten, dass Linearkombinationen mit stark reduziertem Ionosphäreinfluss auch eine geringere Wellenlänge aufweisen, was wiederum die Mehrdeutigkeitsfixierung erschweren kann. Wählt man zur Fixierung von Mehrdeutigkeiten jedoch eine geometriereduzierte Linearkombination, so sollte man einen guten Kompromiss zwischen nicht zu starkem Ionosphäreinfluss und im Gegensatz dazu möglichst großer Wellenlänge finden.

Vergleicht man die Linearkombinationen von GPS mit denen von GALILEO, finden sich aufgrund gleicher bzw. ähnlicher Frequenzbereiche naturgemäß ähnlich „gute“ Linearkombinationen. Interessant bei GALILEO ist die „Super Wide Lane“ durch Kombination des *E5a* und *E5b* Signals. Weitere interessante Linearkombinationen werden im Zusammenhang mit der Mehrdeutigkeitslösung in Kapitel 4 und 5 vorgestellt.

Signal	a_1	a_2	λ_{LK} [mm]	$ V_{ION} $	$\frac{ION_{LK}[m]}{ION_{L_{1;2}}[m]}$	$\sigma_{\phi,LK}$ [mm]	$\sigma_{\phi,LK}$ [cyc]
E₁	1	0	190	0,812	1,000	1,0	0,005
E₆	0	-1	234	1,232	1,518	1,0	0,004
L ^{„N“}	1	-1	105	1,000	1,232	0,7	0,007
L ^{„W“}	1	1	1011	1,000	1,232	6,8	0,007
L _{2;1}	2	1	160	0,525	0,646	1,8	0,011
L _{154;125}	154	125	4	0,000	0,000	3,5	0,969
L _{125;154}	125	145	∞	∞	∞		
L _{4;5}	4	5	3256	30,00	36,96	97,5	0,030
L _{2;3}	2	3	437	3,164	3,898	7,2	0,017
E₁	1	0	190	0,766	1,000	1,0	0,005
E_{5b}	0	-1	248	1,305	1,703	1,0	0,005
L ^{„N“}	1	-1	108	1,000	1,305	0,7	0,007
L ^{„W“}	1	1	814	1,000	1,305	5,4	0,007
L _{2;1}	2	1	154	0,432	0,563	1,7	0,011
L _{77;59}	77	59	6	0,000	0,000	2,8	0,469
L _{59;77}	59	77	∞	∞	∞		
L _{1;2}	1	2	357	2,317	3,024	3,4	0,010
E₆	1	0	234	0,920	1,000	1,0	0,004
E_{5a}	0	-1	255	1,087	1,181	1,0	0,004
L _N	1	-1	122	1,000	1,087	0,7	0,006
L _W	1	1	2931	1,000	1,087	17,0	0,006
L _{2;1}	2	1	217	0,778	0,845	2,0	0,009
L _{25;23}	25	23	61	0,000	0,000	8,5	0,140
L _{23;25}	23	25	∞	∞	∞		
L _{12;13}	12	13	5861	49,00	53,26	424	0,072
L _{1;2}	1	2	279	1,286	1,398	2,5	0,009
E_{5b}	1	0	248	0,975	1,000	1,0	0,004
E_{5a}	0	-1	255	1,026	1,053	1,0	0,004
L _N	1	-1	126	1,000	1,026	0,7	0,006
L _W	1	1	9768	1,000	1,026	54,9	0,006
L _{2;1}	2	1	242	0,926	0,950	2,2	0,009
L _{39;38}	39	38	126	0,004	0,004	27,4	0,217
L _{118;115}	118	115	42	0,000	0,000	27,5	0,655
L _{115;118}	115	118	∞	∞	∞		
L _{1;2}	1	2	262	1,080	1,109	2,3	0,009

Tabelle 2-7: Ausgewählte Linearkombinationen aus zwei Signalen für GALILEO

2.4.2 Linearkombinationen mit drei Signalen

2.4.2.1 Theoretische Grundlagen

Für Linearkombinationen aus drei unterschiedlichen Signalen werden mehrere mögliche (identische!) Darstellungsformen vorgestellt, da diese alle in der Literatur zu finden sind (SCHÜLER [2001], FENG [2004], JI ET AL. [2006]).

Die drei unterschiedlichen Frequenzen/Signale werden allgemein abgekürzt mit den Indizes 1, 2 und 3.

Frequenz der Linearkombination:

$$f_{LK} = a_1 \cdot f_1 - a_2 \cdot f_2 - a_3 \cdot f_3 \quad (2-11)$$

Wellenlänge der Linearkombination:

$$\lambda_{LK} = \frac{c}{a_1 \cdot f_1 - a_2 \cdot f_2 - a_3 \cdot f_3} = \frac{c}{f_{LK}} = \frac{1}{\frac{a_1}{\lambda_1} - \frac{a_2}{\lambda_2} - \frac{a_3}{\lambda_3}} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3}{a_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 - a_2 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_3 - a_3 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2} \quad [m] \quad (2-12)$$

Kodebeobachtung der Linearkombination:

$$\frac{\rho_{LK}}{\lambda_{LK}} = a_1 \frac{\rho_1}{\lambda_1} - a_2 \frac{\rho_2}{\lambda_2} - a_3 \frac{\rho_3}{\lambda_3} \quad \rho_i [m] \quad (2-13)$$

Trägerphasenbeobachtung der Linearkombination:

$$\begin{aligned} \varphi_{LK} &= a_1 \cdot \varphi_1 - a_2 \cdot \varphi_2 - a_3 \cdot \varphi_3 \quad \varphi_i [\text{cyc}] \\ \varphi_{LK} &= \frac{a_1 \cdot f_1 \cdot \varphi_1 - a_2 \cdot f_2 \cdot \varphi_2 - a_3 \cdot f_3 \cdot \varphi_3}{a_1 \cdot f_1 - a_2 \cdot f_2 - a_3 \cdot f_3} = a_1 \cdot \frac{\lambda_{LK}}{\lambda_1} \cdot \varphi_1 - a_2 \cdot \frac{\lambda_{LK}}{\lambda_2} \cdot \varphi_2 - a_3 \cdot \frac{\lambda_{LK}}{\lambda_3} \cdot \varphi_3 \quad \varphi_i [m] \end{aligned} \quad (2-14)$$

Mehrdeutigkeiten der Linearkombination:

$$N_{LK} = a_1 \cdot N_1 - a_2 \cdot N_2 - a_3 \cdot N_3 \quad (2-15)$$

Verhältnis des ionosphärischen Einflusses auf die Linearkombination zu ionosphärischem Einfluss auf der Grundfrequenz $L1$; es folgt die Herleitung:

$$\begin{aligned} ION_{LK} &= \frac{a_1 \cdot f_1 \cdot ION_1 - a_2 \cdot f_2 \cdot ION_2 - a_3 \cdot f_3 \cdot ION_3}{a_1 \cdot f_1 - a_2 \cdot f_2 - a_3 \cdot f_3} \quad ION_i [m] \\ \text{mit } ION_i &= \frac{K}{f_i^2} \\ ION_{LK} &= \frac{f_1^2 \cdot \left(\frac{a_1}{f_1} - \frac{a_2}{f_2} - \frac{a_3}{f_3} \right)}{a_1 \cdot f_1 - a_2 \cdot f_2 - a_3 \cdot f_3} \cdot \frac{K}{f_1^2} = \frac{a_1 - a_2 \cdot \frac{f_1}{f_2} - a_3 \cdot \frac{f_1}{f_3}}{a_1 - a_2 \cdot \frac{f_2}{f_1} - a_3 \cdot \frac{f_3}{f_1}} \cdot \frac{K}{f_1^2} = \beta \cdot \frac{K}{f_1^2} \end{aligned} \quad (2-16)$$

$$\beta \triangleq \frac{ION_{LK} [m]}{ION_{L1} [m]}$$

Standardabweichung der undifferenzierten Linearkombination:

$$\sigma_{\varphi_{LK}} = \sqrt{(a_1 \cdot \sigma_{\varphi_{L1}})^2 + (a_2 \cdot \sigma_{\varphi_{L2}})^2 + (a_3 \cdot \sigma_{\varphi_{L3}})^2} \quad \sigma_{\varphi_{Li}} \text{ [cyc]}$$

$$\sigma_{\varphi_{LK}} = \sqrt{\left(a_1 \cdot \frac{\sigma_{\varphi_{L1}}}{\lambda_1}\right)^2 + \left(a_2 \cdot \frac{\sigma_{\varphi_{L2}}}{\lambda_2}\right)^2 + \left(a_3 \cdot \frac{\sigma_{\varphi_{L3}}}{\lambda_3}\right)^2} \cdot \lambda_{LK} \quad \sigma_{\varphi_{Li}} \text{ [m]} \quad (2-17)$$

2.4.2.2 Linearkombinationen für GPS

Aus den Kode- bzw. Trägerphasenmessungen auf drei Frequenzen lässt sich die Linearkombination aus $L1$, $L2$ und $L5$ bilden. Besonders interessante Kombinationen sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst, eine ausführlichere Tabelle findet sich im Anhang (Tabelle A-3).

Signal	a_1	a_2	a_3	λ_{LK} [mm]	$\frac{ION_{LK}[m]}{ION_{Li}[m]}$	$\sigma_{\varphi,LK}$ [mm]	$\sigma_{\varphi,LK}$ [cyc]
L_1	1	0	0	190	1,000	1,0	0,005
L_2	0	-1	0	244	1,647	1,0	0,004
L_5	0	0	-1	235	1,793	1,0	0,004
$L_{\text{“N2“}}$	1	-1	1	184	0,915	1,4	0,008
$L_{\text{“W“}}$	1	1	1	362	3,085	2,8	0,008
$L_{1;4;-3}$	1	4	-3	1542	0,940	32,2	0,021
$L_{2;-1;2}$	2	-1	2	148	0,471	2,0	0,014
$L_{1;6;-5}$	1	6	-5	3256	0,074	103,8	0,032
$L_{77;84;-23}$	77	84	-23	7	0,000	3,6	0,539
$L_{10;9;4}$	10	9	4	∞	∞		
$L_{2;2;1}$	2	2	1	624	6,245	8,7	0,014

Tabelle 2-8: Ausgewählte Linearkombinationen aus drei Signalen für GPS

2.4.2.3 Linearkombinationen für GALILEO

Aus den Kode- bzw. Trägerphasenmessungen auf drei Frequenzen wurden Linearkombinationen aus $E1$, $E5a$ und $E6$ bzw. $E1$, $E5a$ und $E5b$ sowie $E1$, $E5a$ und $E5ab$ gebildet. Auch hier sei auf eine ausführliche Tabelle im Anhang verwiesen (Tabelle A-4) sowie auf die Kapitel 4 und 5 für eine detaillierte Diskussion der hier vorgestellten Linearkombinationen.

Signal	a ₁	a ₂	a ₃	λ_{LK} [mm]	$\frac{ION_{LK}[m]}{ION_{L1}[m]}$	$\sigma_{\phi,LK}$ [mm]	$\sigma_{\phi,LK}$ [cyc]
E₁	1	0	0	190	1,000	1,0	0,005
E_{5a}	0	-1	0	255	1,793	1,0	0,004
E₆	0	0	-1	234	1,518	1,0	0,004
L ^{“N2“}	1	1	-1	179	0,838	1,4	0,008
L ^{“W“}	1	1	1	341	2,813	2,7	0,008
L _{1;2;-2}	1	2	-2	168	0,695	2,1	0,013
L _{1;-2;3}	1	-2	3	3256	0,304	51,8	0,016
L _{154;138;-25}	154	138	-25	3	0,000	2,6	0,980
L _{5;-2;8}	5	-2	8	∞	∞	∞	
L _{1;3;-1}	1	3	-1	444	4,166	6,0	0,014
E₁	1	0	0	190	1,000	1,0	0,005
E_{5a}	0	-1	0	255	1,793	1,0	0,004
E_{5b}	0	0	-1	248	1,703	1,0	0,004
L ^{“N2“}	1	1	-1	187	0,947	1,4	0,008
L ^{“W“}	1	1	1	371	3,205	2,9	0,008
L _{2;-1;2}	2	-1	2	157	0,600	2,2	0,014
L _{1;-8;9}	1	-8	9	2442	0,420	118	0,048
L _{77;115;-59}	77	115	-59	5	0,000	3,4	0,651
L _{9;10;2}	9	10	2	∞	∞	∞	
L _{1;3;-1}	1	3	-1	401	3,612	5,4	0,014
E₁	1	0	0	190	1,000	1,0	0,005
E_{5a}	0	-1	0	255	1,793	1,0	0,004
E_{5ab}	0	0	-1	252	1,747	1,0	0,004
L ^{“N2“}	1	1	-1	188	0,973	1,4	0,008
L ^{“W“}	1	1	1	378	3,301	2,9	0,008
L _{2;-1;2}	2	-1	2	154	0,564	2,1	0,014
L _{1;-19;20}	1	-19	20	3256	0,098	355	0,109
L _{77;115;-59}	154	-115	233	3	0,000	3,9	1,310
L _{9;8;4}	9	8	4	∞	∞	∞	
L _{1;-1;3}	1	-1	3	364	3,112	5,0	0,014

Tabelle 2-9: Ausgewählte Linearkombinationen aus drei Signalen für GALILEO

3 Atmosphärische Laufzeitverzögerungen

In Abbildung 3-1 ist der Aufbau der Atmosphäre schematisch dargestellt, dabei wird zwischen einer Neutralgaskomponente und einer ionisierten Komponente unterschieden. Beide Komponenten spielen in der Satellitennavigation eine wichtige Rolle.

Die Atmosphäre wird in der Regel durch mehr oder weniger klar abzugrenzende Schichten beschrieben. An der Erdoberfläche beginnt die Troposphäre, sie wird durch die Tropopause in einer Höhe von ca. 8 km an den Polen und bis zu 18 km Höhe am Äquator begrenzt. In ihr befinden sich ca. 90 Prozent der Luft sowie fast das gesamte Wasser (genauer Wasserdampf) der Atmosphäre; das Wetter spielt sich nahezu ausschließlich in der Troposphäre ab. Des Weiteren zeichnet sich die Troposphäre durch eine fast lineare Temperaturabnahme von ca. $6,5^\circ\text{C}/\text{km}$ aus. Die darüber liegende Stratosphäre ist dagegen nahezu trocken, muss aber genau genommen aufgrund der weiteren Druckabnahme ebenfalls in der Satellitennavigation berücksichtigt werden. Vereinfachend wird aber im Folgenden nur noch von der „Troposphäre“ gesprochen.

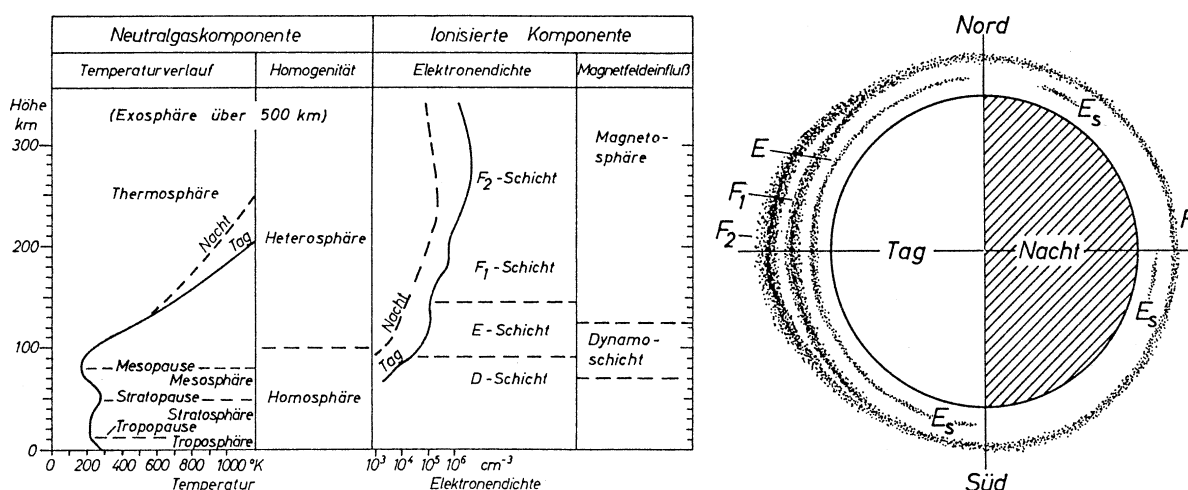


Abbildung 3-1: Übersicht über die Atmosphäre (links) sowie vereinfachte und überhöhte Darstellung der Ionosphärenschichten im Tag-/Nacht-Wechsel gemäß KERTZ [1971].

Die ionisierte Komponente bzw. die Ionosphäre beginnt in einer Höhe von ca. 70 km; eine klare obere Grenze existiert nicht, da mit zunehmender Höhe die Atmosphärendichte und somit die Anzahl ionisierter Teilchen immer langsamer abnimmt, somit reicht die Ionosphäre bis in den unteren Teil der Exosphäre in einer Höhe von ca. 500-800 km.

Im Folgenden werden die Charakteristika und Phänomene der Ionosphäre sowie der Troposphäre näher beschrieben. Weitere Schwerpunkte liegen auf der Beschreibung von Extremereignissen und Korrekturmodellen für die Satellitennavigation.

3.1 Ionosphäre

Die Ionosphäre ist ein dispersives Medium, d.h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen hängt von der Frequenz ab. Nach SEEBER [1989, 2003] unterscheidet sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Phase v_p von der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Wellengruppe v_g , die bei Kodemessungen anzusetzen ist. Dadurch kommt es zu einer ionosphärischen Laufzeitverzögerung mit umgekehrtem Vorzeichen für Kode- und Trägerphasenmessungen, s. Kapitel 3.1.3. Grundsätzlich ist es möglich, über die Messungen auf zwei oder mehr Frequenzen diese Laufzeitverzögerung zu bestimmen und zu eliminieren, dies funktioniert aber nur für Kodemessungen. Bei der Nut-

zung der ionosphärenfreien Linearkombination von Trägerphasenmessungen muss man jedoch praktisch gesehen auf eine Fixierung der Mehrdeutigkeiten verzichten (s. Anmerkung zur Nutzung der ionosphärenfreien Linearkombination in Kapitel 2.4.1.2). Eine schnelle präzise Positionierung erfordert hingegen die Fixierung der Mehrdeutigkeiten (und zwar vorzugsweise auf den originären Trägern), weshalb die Ionosphäre auch bei Nutzung von Zwei- oder Mehrfrequenzempfängern eine wichtige Rolle spielt.

Aus Abbildung 3-1 ist erkennbar, dass die Elektronendichte mit der Höhe variiert. Nach KERTZ [1971] wird ab einer Höhe von ca. 70 km die Bewegung der Elektronen quer zum Erdmagnetfeld behindert, währenddessen die Ionen noch frei der Bewegung des neutralen Atmosphärgases folgen können. Dadurch entstehen elektrische Felder, weshalb man auch von einer Dynamoschicht spricht. Diese elektrischen Ströme verursachen einen großen Teil der erdmagnetischen Variationen. Oberhalb einer Höhe von 130 km spielt das Neutralgas keine Rolle mehr, alle geladenen Teilchen werden maßgeblich durch das Erdmagnetfeld gelenkt, man spricht von der Magnetosphäre.

Die Dichte des ionisierbaren Gases nimmt aufgrund der mit der Höhe abnehmenden Schwerebeschleunigung nach oben hin ab. Gleichzeitig steigt aber die Intensität der ionisierenden Strahlung an. Die Ionenproduktion hängt sowohl von der Absorption der vorhandenen Gase als auch von der Strahlungsintensität ab, wodurch sich verschiedene Ionisationsschichten herausbilden.

Die Theorie der Schichtbildung wurde von Sydney Chapman (1888-1970)⁶ entwickelt und ist in den wesentlichen Gedanken noch heute gültig. Eine wichtige Rolle spielt hierbei die Ionisation, die von der Stärke der Sonneneinstrahlung abhängig ist, d.h. zum einen gibt es eine tägliche (Sonnenauf-/untergang) und jährliche (von den Jahreszeiten abhängige) Variation. Zum anderen treten Variationen durch verstärkte Sonnenaktivitäten auf, die periodisch etwa alle 11 Jahre auftreten, s. Kapitel 3.1.1.

Rechts in Abbildung 3-1 sind die einzelnen Ionosphärenschichten für die Tag- und Nachtseite dargestellt. Die F-Schicht ist die höchste und auch am stärksten ionisierte Schicht. Am Tag spaltet sich diese in eine F_1 - und F_2 -Schicht auf, in der Nacht existiert nur die F_2 -Schicht, die dann F-Schicht genannt wird. Die F_1 -Schicht variiert insbesondere mit der Sonnenfleckenrelativzahl (SEEBER [1989]), s. Kapitel 3.1.1. Eine E-Schicht findet man nur auf der Tagseite, sporadische E-Schicht-Ionisationen E_s treten häufig, aber nicht regelmäßig am magnetischen Äquator und in den Polgebieten auf. Die D-Schicht erreicht in der Regel nur eine sehr geringe Ionisation, die nur bei Sonneneruptionen größer wird. In Tabelle 3-1 sind die Charakteristika der ionosphärischen Schichten nochmals zusammengefasst.

Schicht	Höhe [km]	Elektronendichte tagsüber n_e [el/m ³]	Elektronendichte nachts n_e [el/m ³]	Bemerkung
D	60 - 90	$10^2 - 10^4$	---	tagsüber vorhanden, Ionisation entsprechend dem Sonnenstand
E	85 - 140	10^5	$2 \cdot 10^3$	tagsüber vorhanden, Ionisation entsprechend dem Sonnenstand
E_s	ca. 110	k.A.	k.A.	sporadisch, bevorzugt im Sommer auftretend
F_1	140 - 200	$3 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^5$	10^3	tagsüber vorhanden, geht nachts mit F_2 zusammen
F_2	200 - 1000	$5 \cdot 10^5 - 10^6$	$3 \cdot 10^5$	Tag und Nacht vorhanden

Tabelle 3-1: Aufbau und Charakteristika der Ionosphärenschichten (KERTZ [1971], SEEBER [1989])

⁶ S. CHAPMAN, J. BARTELS [1940]: *Geomagnetism*; Oxford 1940, Nachdruck (ohne Tabellenanhang) 1951.

3.1.1 Aktivität der Ionosphäre

Der Grad der Ionisation und somit die „Aktivität“ der Ionosphäre hängt primär von der Sonnenaktivität ab. Eine häufig genutzte Maßzahl zur Beschreibung der erdmagnetischen Aktivität ist der planetare Index K_p . Der Geophysiker Julius Bartels (1899-1964) führte 1939 K_p zur Charakterisierung des magnetischen Störungszustandes der ganzen Erde (K_p für planetar) ein (KERTZ [1971]). Die Werte für K_p setzen sich aus lokalen, bereinigten Indizes K von 13 über die ganze Erde ausgewählten Observatorien zusammen. Der Index K beschreibt dabei auf einer logarithmischen Skala die maximale Schwankung der Magnetfeldintensität (magnetische Flussdichte) innerhalb eines dreistündigen Zeitintervalls. Die Veröffentlichung dieser dreistündigen K_p -Werte hat sich schnell durchgesetzt, so dass man auch von einer Art „Wettertelegramm“ für die Ionosphäre sprechen kann. Inzwischen hat man herausgefunden, dass mit K_p auch die Geschwindigkeit des Plasmas im interplanetaren Raum beschrieben werden kann.

K_p -Werte erreichen Werte zwischen 1 und 9; Werte zwischen 1 und 3 gelten als ruhig, 4 als schwach gestört, 5 und 6 als mäßig gestört sowie 7 bis 9 als stark gestört. Auf der Seite des GeoForschungsZentrums GFZ⁷ findet man weiterführende Informationen sowie WWW-Links zu K_p -Daten der vergangenen Jahre. In Anhang B sind die Werte exemplarisch für die Jahre 2003 und 2006 dargestellt. Dabei kann man gut den Unterschied zwischen einer ruhigeren Ionosphäre im Jahr 2006 und einer aktiveren Ionosphäre im Jahr 2003 erkennen.

Die Sonnenaktivität ist neben täglichen und jahreszeitlichen Einflüssen durch einen elfjährigen Sonnenfleckenzklus geprägt. Die Aktivität der Sonne durch die Anzahl der Sonnenflecken zu beschreiben geht bis ins 19. Jahrhundert zurück. Im Jahr 1847 führte der Astronom Rudolf Wolf (1816-1893) die Sonnenfleckenzahl R ein:

$$R = 10 \cdot g + f \quad (3-1)$$

Dabei bezeichnet g die Anzahl der Fleckengruppen und f die Anzahl der einzelnen Flecken. In Abbildung 3-2 ist die Sonnenfleckenzahl der vergangenen 50 Jahre dar-

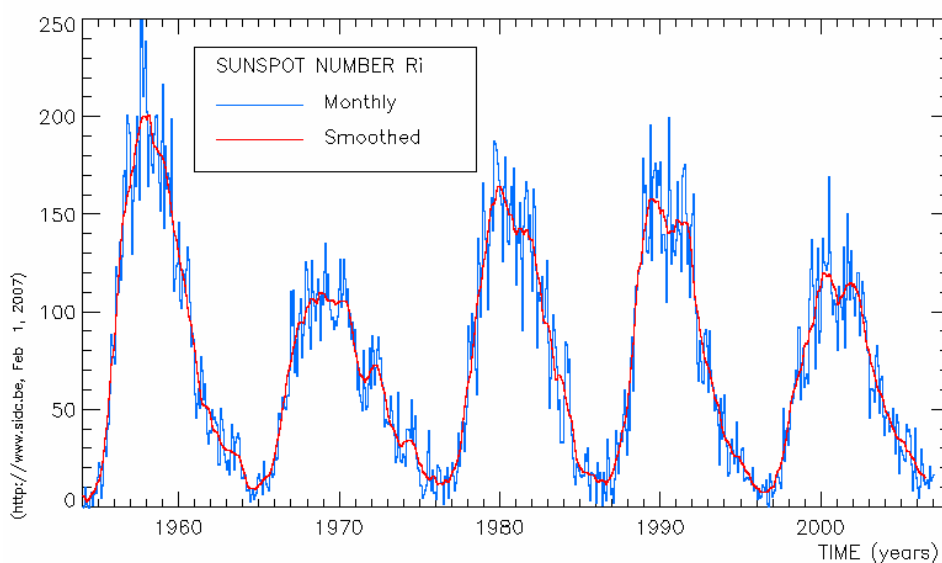


Abbildung 3-2: Sonnenfleckenzahl der Jahre 1954-2007 (Quelle: <http://sidc.oma.be/html/wolfmms.html>)

⁷ WWW: http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/GeoMag/niemegk/kp_index/index.html

gestellt. In einem Jahr minimaler Sonnenfleckenaktivität liegt R bei Werten von 0 – 20, was 0 – 3 kleineren Sonnenflecken entspricht. In Jahren maximaler Aktivität werden jedoch durchschnittlich 5 – 10 größere Fleckengruppen beobachtet, so dass Monatsmittelwerte für R zwischen 60 und 200 erreicht werden. Mit moderneren Beobachtungsinstrumenten können heute auch kleinere Flecken besser erkannt werden, jedoch werden diese Beobachtungen durch Vergleichsmessungen mit einem klassischen Fernrohr mit Hilfe eines Reduktionsfaktors k ($k < 1$) auf die ursprüngliche Skala zurückgerechnet (KERTZ [1971]):

$$R = k \cdot (10 \cdot g + f) \quad (3-2)$$

Durch Rückverfolgung der Sonnenfleckenanzahl bis zur Mitte des 18. Jahrhunderts konnte ein im Durchschnitt elfjähriger Zyklus festgestellt werden, wobei die Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Maxima zwischen 7 und 17 Jahren variieren kann. Dieser Zyklus wird auch nach seinem Entdecker – dem Astronom Samuel Heinrich Schwabe – Schwabe-Zyklus genannt. Sonnenflecken entstehen durch Störungen im solaren Magnetfeld, meistens treten die Flecken in Paaren mit gegensätzlicher magnetischer Polarität auf.

Ein ionosphärischer Sturm ist eine besonders große ionosphärische Irregularität, die häufig in Verbindung mit einem geomagnetischen Sturm, einer besonders schweren Störung der Magnetosphäre (s. Abbildung 3-1) der Erde, auftritt. Ionosphärische Stürme sind insbesondere in Zeiten hoher, jedoch bereits abnehmender Sonnenaktivität nach dem Maximum des elfjährigen Sonnenfleckenzyklus zu beobachten. Sie bestehen im Allgemeinen aus einer positiven und einer negativen Phase, die jeweils mit erheblichen Erhöhungen bzw. Verminderungen der Elektronendichte (geringer bzw. sehr hoher VTEC-Wert) verbunden sind (FÖRSTER UND JAKOWSKI [2000]).

Für die Bestimmung der ionosphärischen Laufzeitverzögerung ist letztlich die Elektronendichte in der Ionosphäre maßgebend, s. Kapitel 3.1.3.

3.1.2 Relevante Phänomene

Für die Satellitennavigation relevante Phänomene sind einerseits die zeitlichen Variationen der Ionosphäre durch Sonnenauf- und untergang, wechselnde Jahreszeiten und im 11-Jahreszyklus verstärkte Sonnenaktivitäten. Andererseits gibt es aber auch geographische Variabilitäten der Ionosphärenaktivität. Als Beispiel sei hier der „äquatoriale Elektrojet“ genannt. Durch Polarisierungseffekte an den Schichtgrenzen der Ionosphäre kommt es zu einer lokalen Erhöhung der Leitfähigkeit am magnetischen Äquatorband. Daraus resultiert ein in der Dynamoschicht (90 – 120 km Höhe) befindlicher, stark gebündelter elektrischer Strom, den man in Analogie zum in der Luftfahrt genutzten troposphärischen Jet-Strom als „Elektrojet“ bezeichnet (KERTZ [1971]).

Alle bisher geschilderten Phänomene beruhen entweder auf klaren Gesetzmäßigkeiten oder können zumindest recht sicher modelliert werden. Anders verhält es sich dagegen bei Szintillationen und wandernden ionosphärischen Störungen, die für die schnelle präzise Positionierung von großer Relevanz sind.

Szintillationen sind starke, kurzperiodische Schwankungen von Phase, Amplitude und Polarisierung beim Empfang einer Radiowelle. Sie werden durch Streuung und Brechung der Welle an kleinräumigen Irregularitäten der Elektronendichte verursacht und

können so stark werden, dass es zu Phasensprüngen bis u.U. hin zu einer Unterbrechung des Signalempfangs kommt. Besonders häufig und intensiv können Szintillationen in hohen Breiten sowie in den Abendstunden im äquatorialen Bereich auftreten. Szintillationen der Phase sind besonders kritisch für die Trägerphasen-Positionierung, da dadurch schnell Phasensprünge hervorgerufen werden können.

Neben diesen kleinräumigen Störungen gibt es wandernde Ionosphärenstörungen (Travelling Ionospheric Disturbances TID), die häufig in mittleren Breiten auftreten, und zwar verstärkt in den Jahren eines Sonnenaktivitätsmaximums, vor allem in den Tageslichtstunden der Wintermonate November bis März (WANNINGER [1999]). Unter TID's versteht man Schwankungen der Plasmadichte, die mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Frequenzen durch die Ionosphäre wandern.

Nach HERNÁNDEZ-PAJARES ET AL. [2006a] unterscheidet man zwischen

- Large Scale TID's (LSTID's) mit einer Periodendauer größer als eine Stunde, einer Phasengeschwindigkeit größer als 300 m/s (bis zu 1000 m/s) und einer Wellenlänge größer 1000 km. Diese scheinen durch geomagnetische Aktivitäten in hohen Breiten verursacht zu werden, wodurch thermosphärische Wellen in Richtung niedriger Breiten produziert werden.
- Medium Scale TID's (MSTID's) mit kürzeren Perioden zwischen 10 min und einer Stunde, geringeren Phasengeschwindigkeiten (50-300 m/s) und Wellenlängen von mehreren 100 km. Sie scheinen mehr durch meteorologische Phänomene wie Winde in der Neutrosphäre oder die Tag-Nacht-Schattengrenze, durch die so genannte „atmospheric gravity waves“ (AGW) erzeugt werden, verursacht zu werden.
- Small Scale TID's (SSTID's) mit Perioden kleiner als 10 min und Wellenlängen von einigen 10 km.

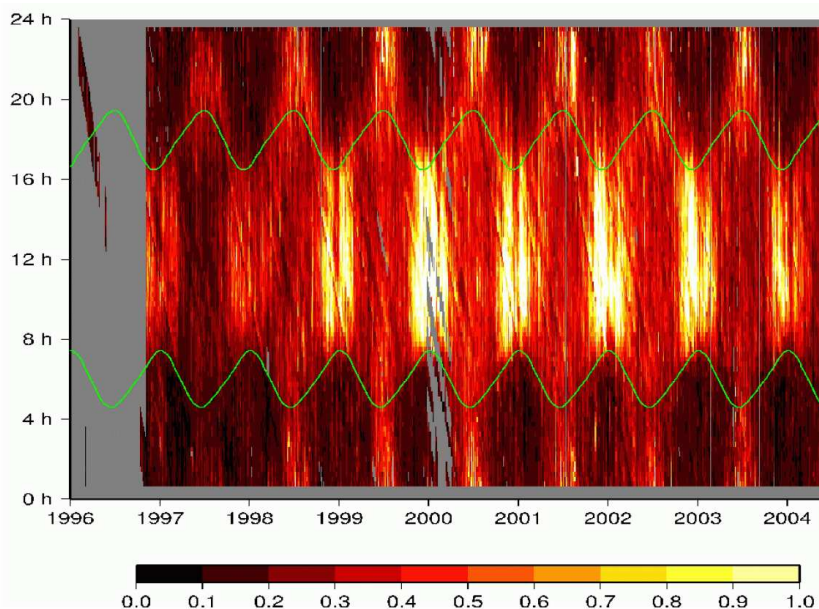


Abbildung 3-3: Amplitude (normiert) von MSTID's in Abhängigkeit vom Tag des Jahres (x-Achse) und der lokalen Zeit (y-Achse), beobachtet auf der Station EBRE in Spanien ($40,6^\circ$ N; $0,5^\circ$ O); die grüne Linie repräsentiert den Sonnenauf-/untergang; Quelle: HERNÁNDEZ-PAJARES ET AL. [2006b]

In HERNÁNDEZ-PAJARES ET AL. [2006b] werden die Eigenschaften von MSTID's näher beschrieben, einige für diese Arbeit relevante Ergebnisse sollen hier vorgestellt werden.

MSTID's bewegen sich hauptsächlich im Winter tagsüber mit einer Geschwindigkeit von ca. 100 – 250 m/s in Richtung Äquator oder im Sommer nachts mit einer Geschwindigkeit von ca. 50 – 150 m/s in westliche Richtung. Typischerweise haben MSTID's nur recht kleine Amplituden von einigen Zehntel TECU, da jedoch ein TECU bereits 0,16 m auf $L1$ entspricht, können auch diese zu Problemen bei der schnellen präzisen Positionierung führen (Fehlfixierung von Phasenmehrdeutigkeiten). In Abbildung 3-3 ist die Amplitude auftretender MSTID's dargestellt. Man erkennt, dass MSTID's vermehrt im Winter tagsüber und im Sommer nachts auftreten. In Abbildung 3-4 sind Charakteristika von MSTID's in Abhängigkeit des Tag des Jahres dargestellt. Die Ergebnisse entstammen GPS-Messungen aus den Jahren 2002 und 2003 aus vier global verteilten Gebieten (Europa, Nordamerika, Mittlerer Osten und Neuseeland).

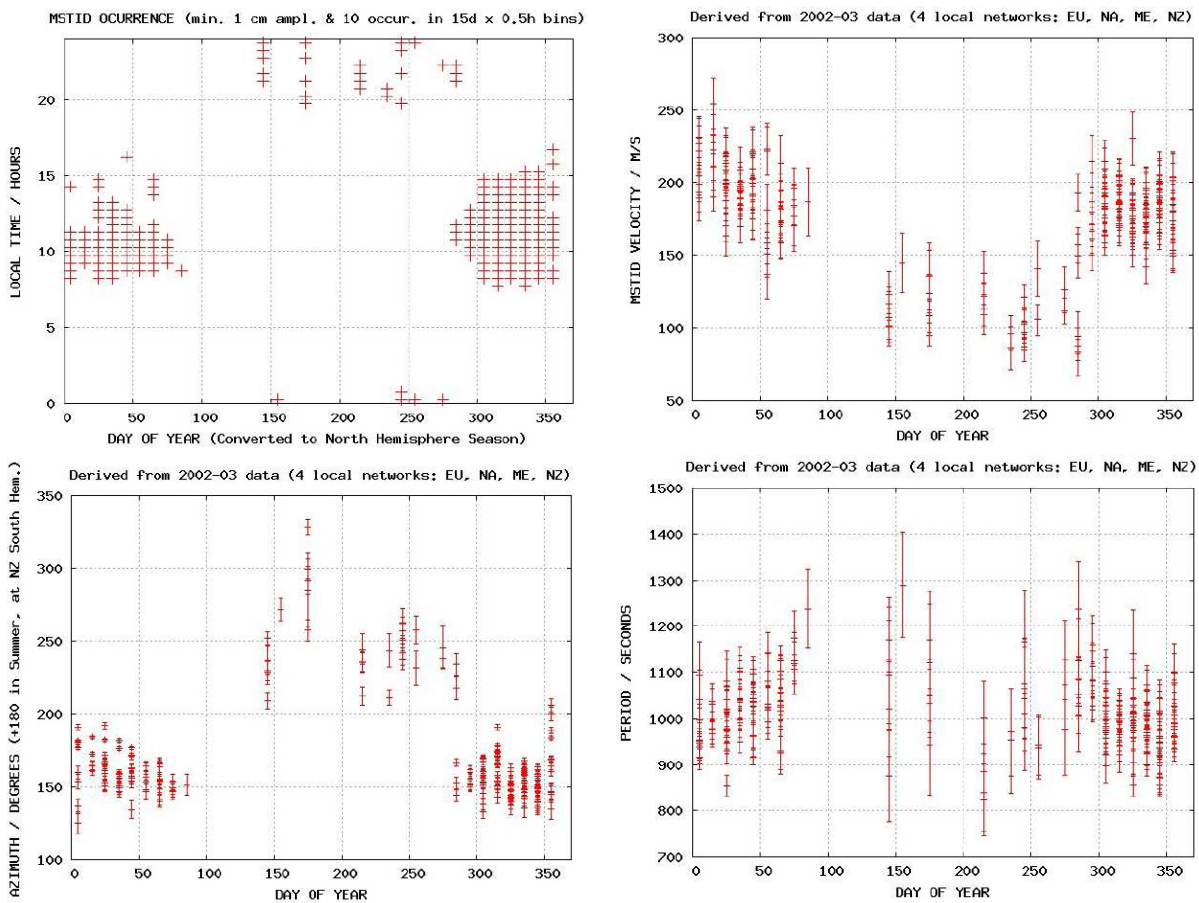


Abbildung 3-4: Auftreten von MSTID's (links oben), Geschwindigkeit dieser MSTID's (rechts oben), Azimut der Wanderrichtung dieser MSTID's (links unten), Periode dieser MSTID's (rechts unten) ; Quelle: HERNÁNDEZ-PAJARES ET AL. [2006b]

Fasst man nun alle aufgeführten, für die Satellitennavigation relevanten Ionosphärenstörungen und deren Charakteristika zusammen, lässt sich nach BAUER [2003] die Erde in drei Hauptregionen einteilen, die ganz unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf den Elektronengehalt und die Art der Störungen aufweisen. Die geographische Ausdehnung dieser Regionen kann Abbildung 3-5 entnommen werden.

In der Äquatorregion ist der stärkste Elektronengehalt anzutreffen. In Abhängigkeit von

Jahreszeit und geographischer Länge treten zwischen einer Stunde nach Sonnenuntergang und bis wenige Stunden nach Mitternacht sehr ausgeprägte kleinräumige Störungen auf.

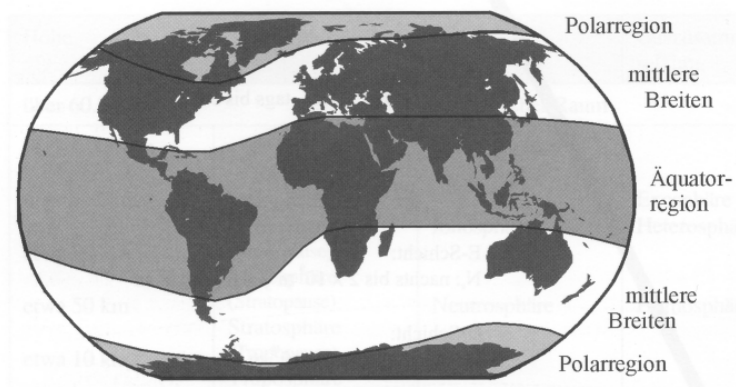


Abbildung 3-5: Geographische Ausdehnung der ionosphärischen Hauptregionen; Quelle: BAUER [2003]

Die *mittleren Breiten* stellen sowohl vom Elektronengehalt her als auch aufgrund der Häufigkeit und Intensität von Störungen die gemäßigten Breiten dar. Hier sind die ionosphärischen Eigenschaften für die Satellitennavigation am günstigsten. Nur selten dringen ionosphärische Störungen aus den Polarregionen bis in die mittleren Breiten vor.

In den *Polarregionen* ist zwar der Elektronengehalt gering, aber auch sehr inhomogen. Aufgrund der Ausprägung des Erdmagnetfeldes entfaltet hier der Partikelstrom in Folge von Sonneneruptionen seine Hauptwirkung in Form von ionosphärischen Störungen (und auch Polarlichtern).

3.1.3 Refraktion und Elektroneninhalt

Die Grundlage der Positionsbestimmung mit Hilfe der Satellitennavigation sind Trägerphasen- oder Laufzeitmessungen an den elektromagnetischen Signalen. Diese Signale werden durch die ionosphärische Refraktion beeinflusst, d.h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Satellitensignale weicht in der Ionosphäre von der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ab. Da es sich bei der Ionosphäre um ein dispersives Medium handelt, unterscheiden sich der Phasen- und der Gruppenbrechungsindex.

Nach SEEBER [1993] ist der ionosphärische Brechungsindex der Phase

$$n_{PH_IONO} = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \quad (3-3)$$

Die Koeffizienten c_i hängen von der Elektronendichte N_e (Anzahl der Elektronen pro m^3) ab. In erster Näherung erhält man somit den Phasen- bzw. Gruppenbrechungsindex:

$$n_{PH_IONO} = 1 - \frac{40,28 \cdot N_e}{f^2} \quad \text{bzw.} \quad n_{GR_IONO} = 1 + \frac{40,28 \cdot N_e}{f^2} \quad (3-4)$$

Mit $v = \frac{c}{n}$ erhält man die Phasengeschwindigkeit v_p bzw. Gruppengeschwindigkeit v_g , d.h. die Phasengeschwindigkeit ist größer als die Gruppengeschwindigkeit. Um den ionosphärisch bedingten Laufzeitfehler zu bestimmen, muss der Brechungsindex entlang des Signalweges integriert werden. Nach MISRA UND ENGE [2001] ist somit der Laufzeitfehler erster Ordnung für das Gruppensignal (also Kodemessungen)

$$\Delta t_{GR_IONO} = + \frac{1}{c} \cdot \frac{40,28 \cdot TEC}{f^2} \quad [\text{sec}] \quad (3-5)$$

und mit umgekehrten Vorzeichen für die Phase (also für Trägerphasenmessungen)

$$\Delta t_{PH_IONO} = - \frac{1}{c} \cdot \frac{40,28 \cdot TEC}{f^2} \quad [\text{sec}]. \quad (3-6)$$

Ein TEC (Total Electronic Content) ist dabei die Anzahl der freien Elektronen, die sich in einer Säule von 1 m² Fläche, die von einem Beobachter bis zu einem Sender (Satelliten) verläuft, befinden. Der TEC wird in der Einheit TECU (TEC Unit) angegeben, 1 TECU = 10¹⁶ Elektronen/m².

Typische Werte an ionosphärisch inaktiven Tagen für den vertikalen TEC in Europa sind 5 – 15 TECU, was einer ionosphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung von ca. 1 -2 m bzw. bis zu 6 m in Richtung eines Satelliten entspricht.

An Tagen mit hoher ionosphärischer Aktivität kann die ionosphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung jedoch Werte von bis zu ca. 25 m (ca. 150 TECU) in äquatorialen Regionen annehmen, bei ionosphärischen Extremereignissen können sogar Werte von bis zu ca. 35 m (deutlich über 200 TECU) auftreten. In Mitteleuropa werden bei derartigen Ereignissen Werte von bis zu ca. 10 m (ca. 60 TECU) erreicht.

Um einen visuellen Eindruck über die ionosphärischen Laufzeitverzögerungen auf der Erde zu erhalten, wurden IONEX-Daten des CODE-Rechenzentrums (mehr Details dazu in Kapitel 3.1.4.2) visualisiert.

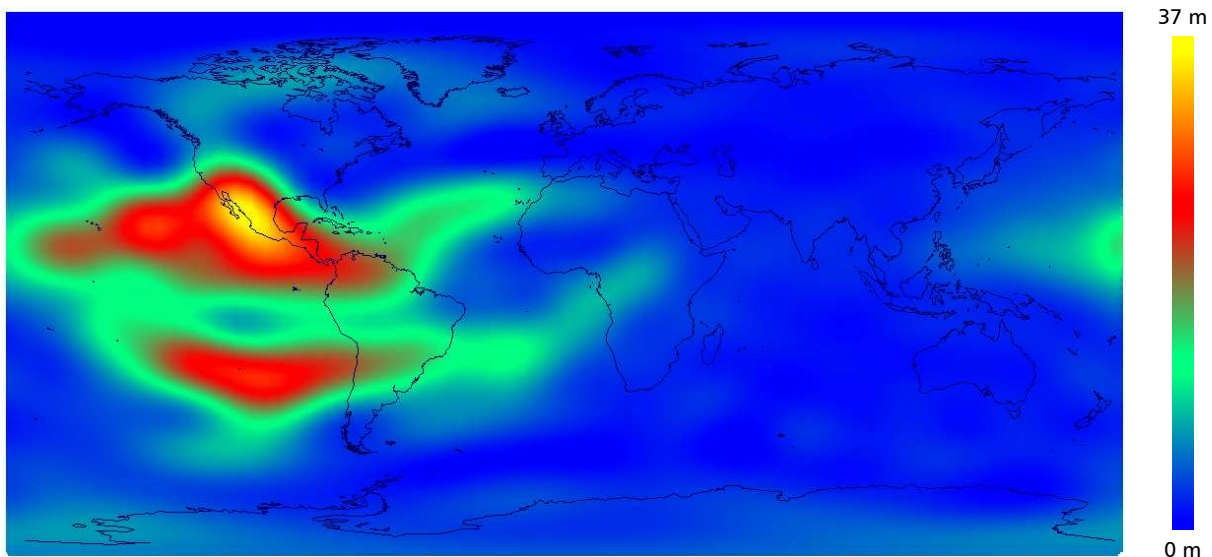


Abbildung 3-6: Ionosphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung am 29. Oktober 2003 um 22 Uhr

Am 29. Oktober 2003 konnte ein geomagnetischer Sturm beobachtet werden. Maximale Werte wurden dabei um 22 Uhr UT im Bereich Mittelamerikas erreicht. Der gelbe Bereich in Abbildung 3-6 entspricht 37 m ionosphärischer Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung. Im Vergleich dazu sind in Abbildung 3-7 mit einer identischen Skalierung die ionosphärischen Laufzeitverzögerungen exakt drei Jahre später dargestellt. Der 29. Oktober 2006 liegt in einem ionosphärisch sehr ruhigen Zeitabschnitt, auf den ersten Blick

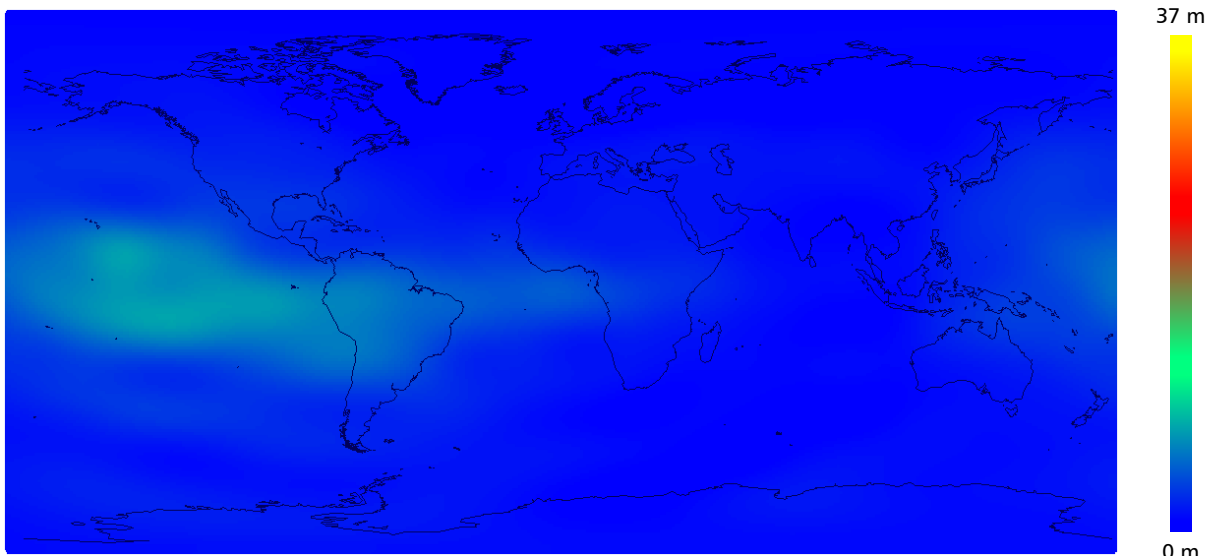


Abbildung 3-7: Ionosphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung am 29. Oktober 2006 um 22 Uhr, gleiche Skalierung wie in Abbildung 3-6

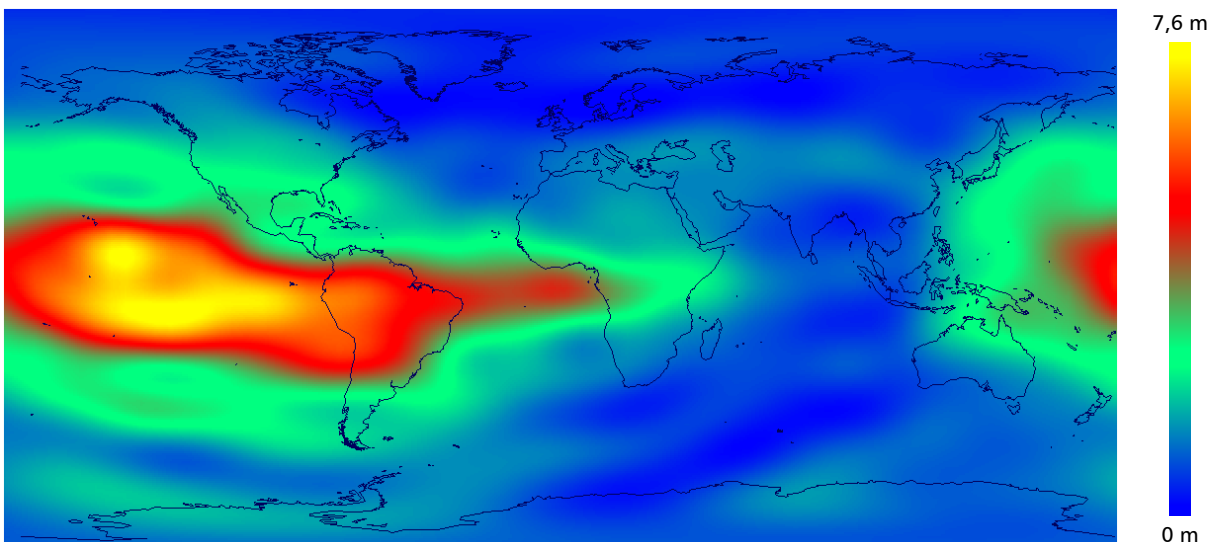


Abbildung 3-8: Ionosphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung am 29. Oktober 2006 um 22 Uhr mit freier Skalierung

scheint es kaum ionosphärische Störungen zu geben. Um auch an diesem Tag die räumlichen Unterschiede zu sehen, sehe man sich Abbildung 3-8 an: Abgesehen von einer anderen Skalierung ist sie identisch mit Abbildung 3-7. Man sieht, dass sowohl im Jahr 2003 als auch im Jahr 2006 im Bereich des Äquators die größten ionosphärischen Laufzeitverzögerungen auftreten, jedoch mit deutlich unterschiedlicher Amplitude.

Wie schon erwähnt, dringen ionosphärische Störungen nur selten bis in mittlere Breiten wie in Mitteleuropa vor. In Abbildung 3-9 ist solch ein Fall dargestellt. Es handelt sich dabei um den 4. November 2003, also einem Zeitraum mit einer durchaus noch aktiveren Ionosphäre, ca. zwei Jahre nach dem Maximum der Sonnenfleckenaktivität. Im äquatorialen (gelben) Bereich erreicht die ionosphärische Laufzeitverzögerung Werte von bis zu ca. 15 m, aber auch im (roten) Bereich von Mitteleuropa werden Werte von bis zu 10 m erreicht. Nach Internetrecherchen fand an diesem Tag die „größte Sonneneruption

aller Zeiten“ statt. Eine Internetseite⁸ beschreibt das Ereignis folgendermaßen: „Zu behaupten, dass die Sonne im Oktober und November letzten Jahres [2003] aktiv war, ist

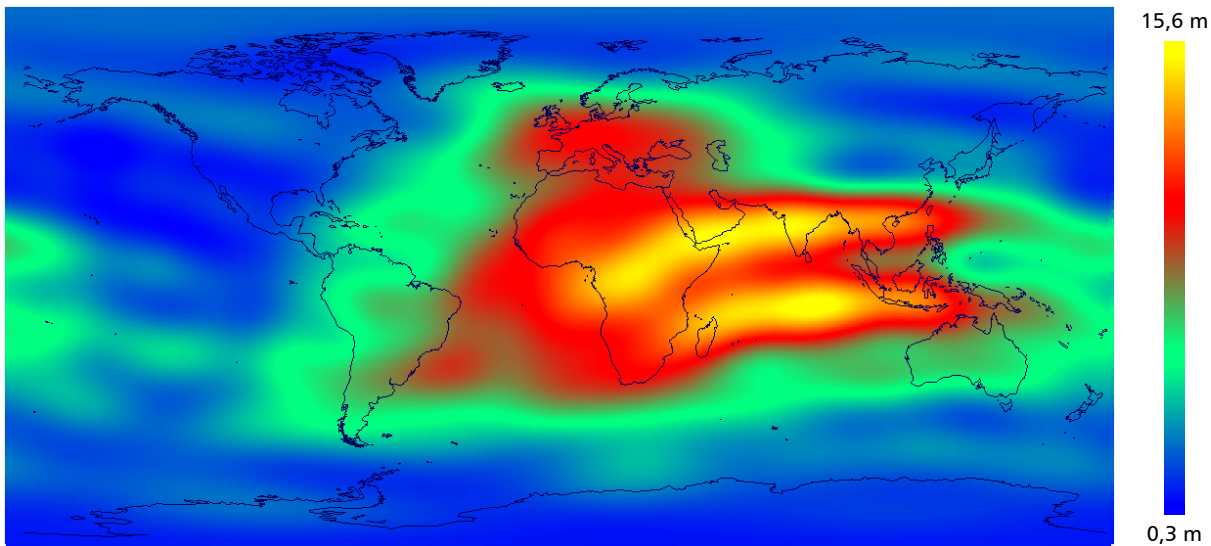


Abbildung 3-9: Ionosphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung am 4. November 2003 um 12 Uhr mit freier Skalierung

eine Untertreibung. Innerhalb von zwei Wochen spie die Sonne eine hohe Anzahl koronarer Massenejektionen aus (coronal mass ejections CME), während die Explosionen stärker waren als alle bisher beobachteten. Die Explosionen, oder *flares* werden klassifiziert. Ein normaler großer *flare* hat X-2. Ein *flare* vom 4. November 2003 hatte eine Stärke von X-28, oder genauer nicht mehr auf der Skala, da es keine geeigneten Messinstrumente gibt. Dazu kommt, dass die Sonne zurzeit dem Aktivitätsminimum ihres elfjährigen Zyklus entgegenght, was die Ausbrüche noch ungewöhnlicher macht.“

Der schon erwähnte Ionosphärensturm Ende Oktober 2003 wurde ausführlich untersucht. Hier seien die Ergebnisse aus zwei ausgewählten Quellen (DEHEL ET AL. [2004])

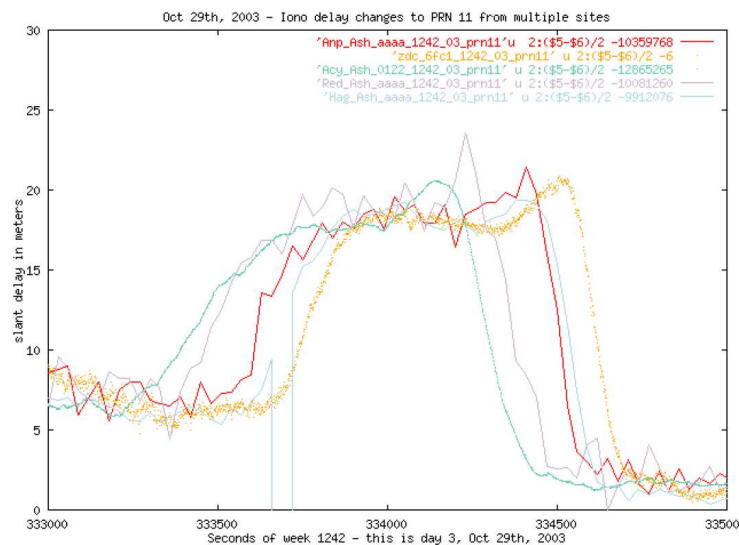


Abbildung 3-10: Ionosphärische Laufzeitverzögerung des GPS-Satelliten PRN 11 am Tag eines geomagnetischen Sturmes (29. Oktober 2003) an verschiedenen Stationen in Washington, D.C., USA; Quelle: DEHEL ET AL. [2004]

⁸ WWW: <http://www.raumfahrt24.de/Artikel/200412160235.html>

sowie LUO ET AL. [2005]) vorgestellt.

In DEHEL ET AL. [2004] wurden verschiedene ionosphärische Irregularitäten in unterschiedlichen Regionen und zu unterschiedlichen Zeitpunkten untersucht. In Abbildung 3-10 ist die auf verschiedenen Stationen beobachtete ionosphärische Laufzeitverzögerung zu einem bestimmten Satelliten während des ionosphärischen Sturmes Ende Oktober 2003 aufgetragen. In ionosphärisch ruhigen Zeiten kann die Ionosphäre über mehrere 100 und sogar 1000 km mit einer Abweichung von bis zu 35 cm als Ebene modelliert werden (DEHEL ET AL. [2004]). Während eines Ionosphärensturms jedoch werden so genannte „Mauern“ beobachtet, die sich mit Geschwindigkeiten von bis zu 500 m/s fortbewegen. Diese verursachen eine starke Zunahme sowie eine daran sich anschließende plötzliche starke Abnahme der ionosphärischen Laufzeitverzögerung, wie in Abbildung 3-10 dargestellt.

Vergleicht man den räumlichen ionosphärischen Gradienten für eine ruhige Ionosphäre – ca. 2-5 mm/km (LUO ET AL. [2005]) – mit dem im Oktober 2003 beobachteten Gradienten von bis zu 400 mm/km (DEHEL ET AL. [2004]), so werden ebenfalls die Ausmaße dieses Extremereignisses deutlich.

In LUO ET AL. [2005] wurden ebenfalls ionosphärische Anomalien untersucht, Abbildung 3-11 zeigt die ionosphärische Laufzeitverzögerung über 7 Stunden. In den ersten 100 Minuten steigt die ionosphärische Laufzeitverzögerung von wenigen Metern auf bis zu 30 m an, in den folgenden 100 Minuten treten einige kleinere Variationen auf, die aber trotzdem als Anomalien bezeichnet werden können. Es folgt dann ein Abfall der ionosphärischen Laufzeitverzögerung von 25 m in 10 Minuten; für diesen Zeitpunkt konnte ein Gradient von ca. 300 mm/km festgestellt werden.

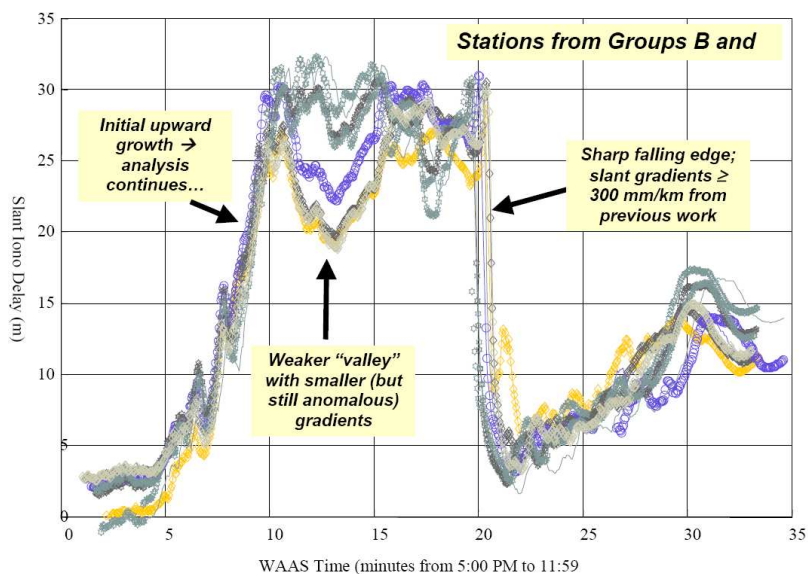


Abbildung 3-11: Ionosphärische Laufzeitverzögerung des GPS-Satelliten PRN 38 am 20. November 2003) an verschiedenen CORS-Stationen in Ohio und Michigan, USA; die x-Achse ist mit 10 min-Intervallen skaliert; Quelle: LUO ET AL. [2005]

Des Weiteren wurde in LUO ET AL. [2005] am 31. Oktober 2003 in Florida eine auf den ersten Blick kleinere ionosphärische Anomalie untersucht. Sie unterscheidet sich jedoch von den zuvor präsentierten Anomalien, da sie über mehrere Stunden mehr oder weniger über Florida „festhing“, sich also nicht mit einer großen Geschwindigkeit fortbewegte. Abbildung 3-12 zeigt die ionosphärische Laufzeitverzögerung zu einem Satelli-

ten, beobachtet auf allen verfügbaren Stationen des CORS (continuously operating reference stations) Netzes in Florida. Da auf allen Stationen der Verlauf der ionosphärischen Laufzeitverzögerung ein ähnliches Verhalten hat, konnte gezeigt werden, dass es sich am 31. Oktober um eine sich langsam fortbewegende Ionosphärenstörung handelte.

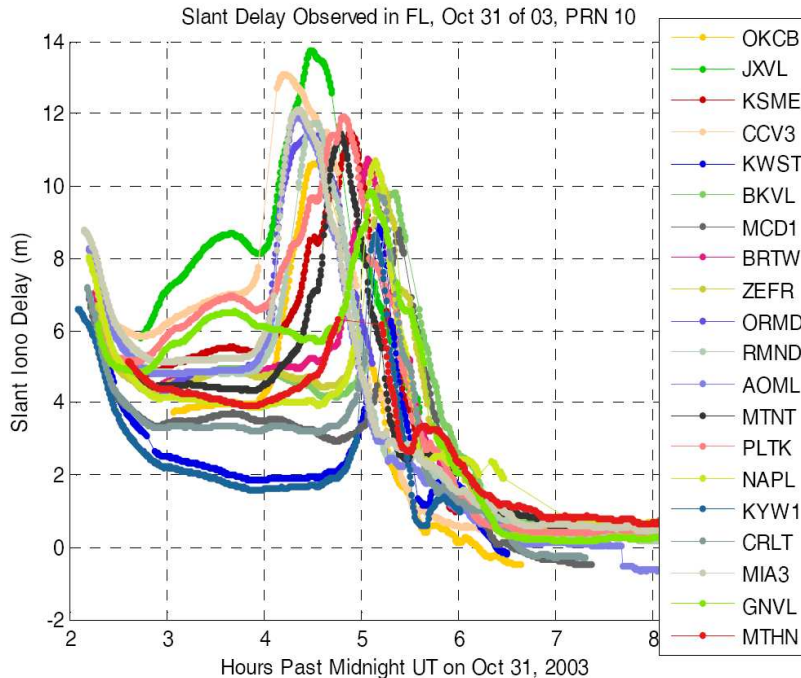


Abbildung 3-12: Ionosphärische Laufzeitverzögerung des GPS-Satelliten PRN 10 am Tag eines geomagnetischen Sturmes (31. Oktober 2003) an verschiedenen CORS-Stationen in Florida, USA; Quelle: LUO ET AL. [2005]

3.1.4 Modelle für die ionosphärische Laufzeitverzögerung

Um die ionosphärische Laufzeitverzögerung bei der Positionierung zu korrigieren, gibt es verschiedene Modelle. Hier seien die im Rahmen dieser Arbeit relevanten Modellansätze kurz erläutert – das Klobuchar-Modell sowie die Verwendung von IONEX-Daten (und daraus abgeleitet ein geglättetes Modell).

3.1.4.1 Klobuchar-Modell

Das Klobuchar-Modell geht von einem Ein-Schicht-Modell der Ionosphäre aus. Hierbei wird für die Nacht eine konstante Laufzeitverzögerung von 5 ns, das entspricht 9 TE-CU, angesetzt. Am Tage wird eine Kosinusfunktion in Abhängigkeit von der lokalen Zeit t am ionosphärischen Subpunkt (wie dieser berechnet wird, wird in Kapitel 6.6 beschrieben) mit einem Maximum für 14 h lokaler Zeit verwendet (MISRA UND ENGE [2001]).

$$\frac{I_z}{c} = \begin{cases} A_1 + A_2 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (t - A_3)}{A_4}\right) & \text{wenn } |t - A_3| < \frac{A_4}{4} \\ A_1 & \end{cases} \quad (3-7)$$

- I_z : Ionosphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung
- A_1 : Nächtlicher Wert für I_z (festgesetzt auf $5 \cdot 10^{-9}$ sec)
- A_2 : Amplitude der Kosinusfunktion
- A_3 : 50400 sec (14 h) lokale Zeit
- A_4 : Variabler Wert (≥ 72000 sec)

Die Amplitude A_2 und die Periode A_4 der Kosinusfunktion sind als Funktion von der geomagnetische Breite φ_M des ionosphärischen Subpunktes gegeben. Sie werden aus jeweils vier Parametern α_i und β_i berechnet, so dass das Gesamtmodell nur aus acht Parametern besteht. Diese acht Koeffizienten werden mit der Navigationsnachricht übermittelt. Das Kontrollzentrum wählt je nach aktueller Sonnenaktivität und des Tag des Jahres aus einer Gruppe von 370 vorgegebenen Koeffizientendatensätzen den geeignetsten Datensatz heraus.

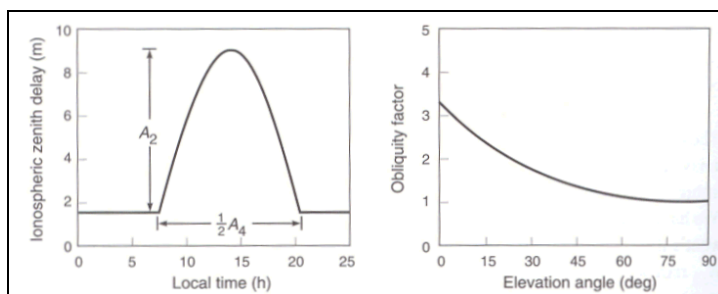


Abbildung 3-13: Klobuchar-Modell und dazugehörige Mappingfunktion, Quelle: MISRA UND ENGE [2001]

Die Umrechnung der vertikalen Laufzeitverzögerung in die Schrägstrecken-Laufzeitverzögerung erfolgt über eine Mappingfunktion (engl. obliquity factor OF)

$$OF_{IONO} = 1,0 + 16,0 \cdot (0,53 - E)^3 \quad (3-8)$$

in Abhängigkeit von der Elevation E (in halben Zyklen). Die einzelnen Rechenschritte zur Bestimmung der ionosphärischen Laufzeitkorrektur aus den Koeffizienten des Klobuchar-Modells findet man in ICD-GPS-200 [1997].

Untersuchungen haben gezeigt, dass mit diesem sehr einfachen Modell ca. 50% des ionosphärischen Laufzeitfehlers korrigiert werden können. Bei der Verwendung sehr viel komplexerer Ionosphärenmodelle könnten jedoch aufgrund der großen täglichen Variabilität des ionosphärischen Elektronengehalts auch nicht mehr als ca. 75% des Laufzeitfehlers korrigiert werden (KLOBUCHAR [1996]).

3.1.4.2 IONEX Ionosphären-Karten

Alternativ zum Klobuchar-Modell finden globale Ionosphärenkarten des IGS im Rahmen dieser Arbeit Verwendung. Diese Daten stehen allerdings nur für die Postprozessierung zur Verfügung. Seit Anfang 1997 werden im Rahmen der Gesamtlösung des IGS am CODE-Rechenzentrum an der Universität Bern globale Ionosphärenkarten erzeugt. Diese ASCII-Dateien speichern VTEC-Werte in 2-Stunden-Intervallen auf einem Gitter mit einer Auflösung von $2,5^\circ$ (Breite) x $5,0^\circ$ (Länge) im so genannten IONEX (Ionosphere Map Exchange) Format ab. Eine detaillierte Formatbeschreibung findet sich in SCHAER ET AL. [1998]⁹.

Die Programme NEREUS (s. Kapitel 4) und SEMIKA (s. Kapitel 5) verwenden aber nicht die Original-IONEX-Karten, sondern ein proprietäres Format. Für das Gebiet eines zuvor bestimmten Referenzstationsnetzes, s. Abbildung 3-14, werden die dazu gehörigen Sub-Ionosphärenpunkte (s. Kapitel 6.6) unter Ansetzung des minimal möglichen Elevati-

⁹ IONEX-Daten können unter <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/YYYY/codgddd0.yyi.z> herunter geladen werden; dabei bezeichnet YYYY das vierstellige Jahr, ddd den dreistelligen Tag des Jahres sowie yy das zweistellige Jahr.

onswinkels berechnet. Daraus werden alle relevanten Gitterzellen der IONEX-Datei bestimmt, so dass z.B. wie in Abbildung 3-14 neun IONEX-Zellen betroffen sind. Dieses Beispiel ist stark vereinfacht: wählt man drei Referenzstationen in Thüringen aus, die in einem Bereich von $50,69^\circ - 51,16^\circ$ n.B. und $10,70^\circ - 11,13^\circ$ ö.L. liegen, so sind bei einer Elevationsmaske von 15° IONEX-Zellen im Bereich von $37,5^\circ - 62,5^\circ$ n.B. und 10° w.L. - 30° ö.L. (80 Gitterzellen) betroffen, bei einer Elevationsmaske von 0° sogar in einem Bereich von $27,5^\circ - 75^\circ$ n.B. und 25° w.L. - 45° ö.L. (266 Gitterzellen).

Innerhalb jeder dieser IONEX-Zellen werden die nötigen Koeffizienten für die bilineare Interpolation a_0 , a_{pp} , a_{ll} und a_{pl} bestimmt, um für jeden beliebigen Punkt P_N den VTEC-Wert interpolieren zu können:

$$VTEC_N = a_0 + a_{pp} \cdot (\varphi_N - \varphi_1) + a_{ll} \cdot (\lambda_N - \lambda_1) + a_{pl} \cdot (\varphi_N - \varphi_1) \cdot (\lambda_N - \lambda_1) \quad (3-9)$$

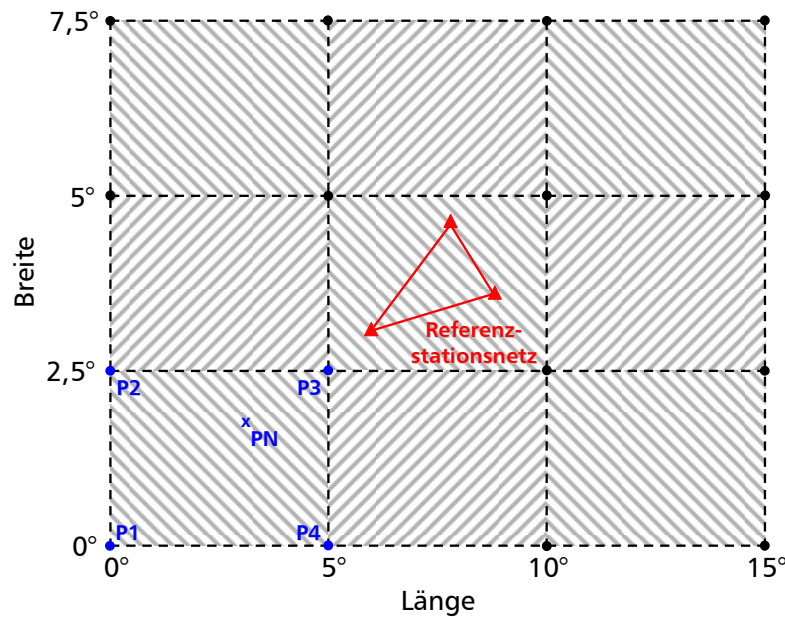


Abbildung 3-14: Interpolation von IONEX-Daten

Mit

$$I = \begin{pmatrix} VTEC_1 \\ VTEC_2 \\ VTEC_3 \\ VTEC_4 \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} 1 & \varphi_1 & \lambda_1 & \varphi_1 \cdot \lambda_1 \\ 1 & \varphi_2 & \lambda_2 & \varphi_2 \cdot \lambda_2 \\ 1 & \varphi_3 & \lambda_3 & \varphi_3 \cdot \lambda_3 \\ 1 & \varphi_4 & \lambda_4 & \varphi_4 \cdot \lambda_4 \end{pmatrix} \quad P = \begin{pmatrix} \sigma_{VTEC_1}^{-2} & & & \\ & \sigma_{VTEC_2}^{-2} & & \\ & & \sigma_{VTEC_3}^{-2} & \\ & & & \sigma_{VTEC_4}^{-2} \end{pmatrix} \quad (3-10)$$

und

$$X = (A^T P A)^{-1} \cdot A^T P I \quad \Sigma_{XX} = (A^T P A)^{-1} \quad (3-11)$$

können die Koeffizienten und die jeweils dazugehörige volle Kovarianzmatrix bestimmt und in einem proprietärem Format abgespeichert werden.

Generell kann man sagen, dass die Genauigkeit unter guten Voraussetzungen leicht bei unter 10 cm liegen kann. In ORÚS ET AL. [2003] wurden hochpräzise, aus GPS-Messungen abgeleitete, doppelt differenzierte ionosphärische Laufzeitverzögerungen mit denen aus IONEX-Daten (kombinierte sowie Einzellösungen der einzelnen Rechenzentren) verglichen. Dazu wurden GPS-Messungen von 6 europäischen Stationen des IGS-

Netzwerks (mit der Station EBRE als Referenzstation) über einen Zeitraum von 18 Tagen verwendet. Dabei zeigte sich, dass die aus verschiedenen Analysezentren kombinierte Lösung am besten passte und der RMS je nach Basislänge zwischen 0,08 m und 0,18 m lag.

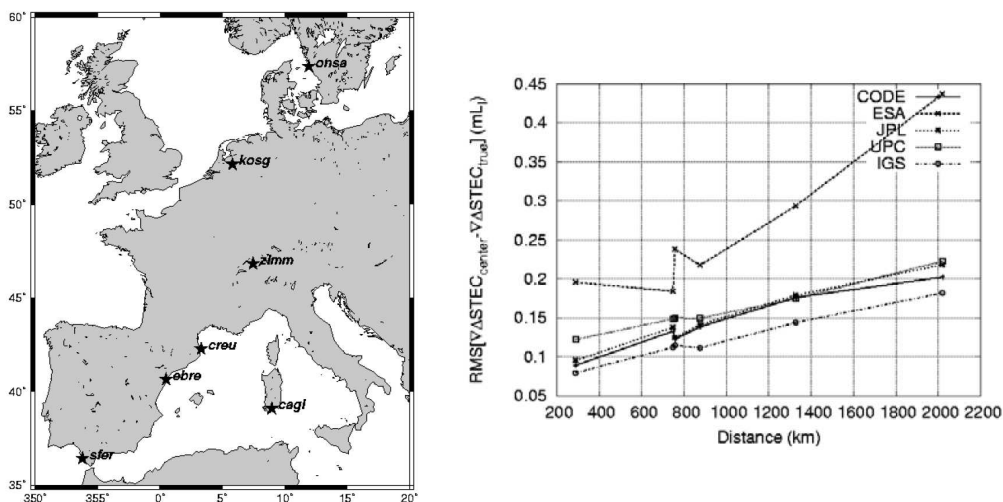


Abbildung 3-15: Karte der für den IONEX-Vergleich verwendeten IGS-Stationen (links), RMS des doppelt differenzierten TEC in Satellitenrichtung (rechts); Quelle: ORÚS ET AL. [2003]

Zu beachten ist hierbei, dass die kürzeste Basislinie immerhin noch 288 km lang ist, so dass für kürzere Basislinien, wie sie z.B. bei der Positionierung im SAPOS[®]-Referenzstationsnetz auftreten, ein noch kleinerer Restfehler zu erwarten ist. Dem steht aber gegenüber, dass im Zeitraum der o.a. Untersuchungen die Ionosphäre eher inaktiv war.

Die räumliche und zeitliche Auflösung der IONEX-Karten reicht somit nicht immer für eine schnelle präzise Positionierung aus, da – wie erwähnt – der Restfehler in doppelten Differenzen durchaus im Dezimeterbereich liegen kann, jedoch kann IONEX im Rahmen der Postprozessierung als Grundmodell fungieren.

3.2 Troposphäre

Wie bereits angedeutet, ist die Bezeichnung „troposphärische Laufzeitverzögerung“ im strengen Sinne nicht korrekt. In der Fachliteratur findet man auch die korrekte Be-

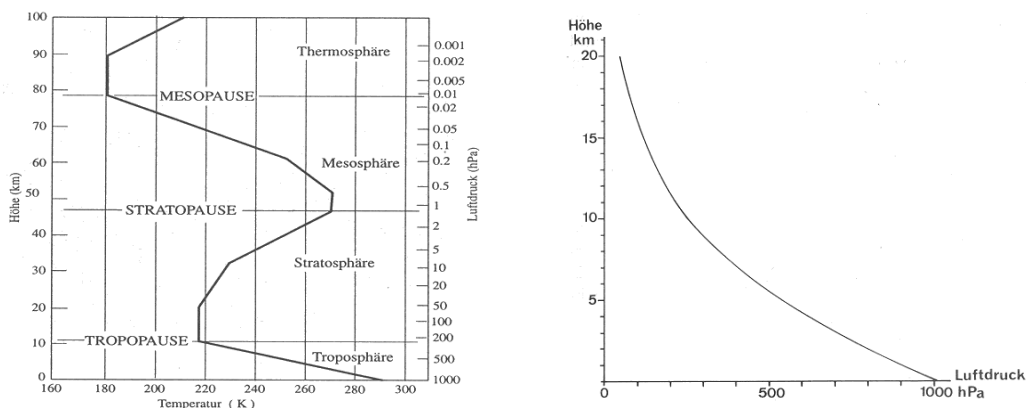


Abbildung 3-16: links: mittlere Temperaturschichtung der Atmosphäre, neben der Höhe in km ist der entsprechende Luftdruck in hPa angegeben, Quelle: v. STORCH ET AL. [1999]; rechts: vertikale Luftdruckverhältnisse, Quelle: MALBERG [2002]

zeichnung „neutrale Laufzeitverzögerung“ oder auf englisch „Zenith Neutral Delay“ (Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung), denn es ist nicht nur die Laufzeitverzögerung in der Troposphäre, sondern auch in der Stratosphäre zu berücksichtigen. Wie in Abbildung 3-16 zu sehen, nimmt der Luftdruck exponentiell mit der Höhe ab. So nimmt in Bodennähe der Luftdruck um 1 hPa pro 8 m ab. Wegen der geringeren Luftdichte werden diese Schritte in der Höhe größer, so gilt z.B. 1 hPa/10 m in 2 km Höhe, 1 hPa/14 m in 5 km Höhe und 1 hPa/25 m in 10 km Höhe (MALBERG [2002]). Man kann jedoch auch in Abbildung 3-16 erkennen, dass die Stratosphäre zur Bestimmung der gesamten neutralen Laufzeitverzögerung durchaus relevant ist, denn in z.B. 30 km Höhe herrscht immer noch ein Luftdruck von ca. 10 hPa.

Des Weiteren kann die Troposphäre als ein Gemisch trockener Gase und feuchtem Wasserdampf angesehen werden. Da die Zusammensetzung der trockenen Gase über alle Höhenbereiche und geographische Regionen als recht homogen angesehen werden kann, der Wasserdampfgehalt jedoch sowohl räumlich als auch zeitlich sehr stark variieren kann, wird die Modellierung der Troposphäre in zwei Komponenten aufgeteilt: eine hydrostatische – auch trockene – (engl. dry, oft mit dem Index d abgekürzt) und eine feuchte (engl. wet, oft mit dem Index w abgekürzt) Komponente (BAUER [2003]).

Die hydrostatische Komponente hängt maßgeblich vom an der Erdoberfläche gemessenen Luftdruck ab (s. Kapitel 3.2.1.1), sie liegt auf Meereshöhe bei ca. 2,3 m in Zenitrichtung, was ca. 90% der gesamten neutralen Laufzeitverzögerung entspricht. Die feuchte Komponente wird durch den Wasserdampfgehalt bzw. die Luftfeuchtigkeit und den Temperaturverlauf beeinflusst. Die Verteilung des Wasserdampfes ist ziemlich variabel und schlecht präzifizierbar, daher ist auch seine Modellierung schwierig.

3.2.1 Modelle für die hydrostatische und feuchte Laufzeitverzögerung

In der Literatur findet man eine Vielzahl von Korrekturmodellen, entweder getrennt für die hydrostatische und die feuchte Laufzeitverzögerung oder aber für die gesamte troposphärische Laufzeitverzögerung. Einen guten Überblick über einige Modelle findet man in SCHÜLER [2001]. Für diese Arbeit wurden jedoch nur zwei Modelle verwendet, die im Folgenden detaillierter vorgestellt werden.

Der erste Ansatz ist ein „blindes“ Modell namens TropGrid, das auf einer klimatologischen Datenbank basiert. Damit kann ein typischer Atmosphärenzustand mit seinen saisonalen und täglichen Variationen gut beschrieben werden. Das Modell versagt jedoch bei besonderen Wetterlagen. Als Alternative stellen sich numerische Wetterfelder, bei denen eine numerische Integration des Refraktionsprofils erfolgt. Damit erzielt man eine deutlich höhere Genauigkeit von durchschnittlich ca. 1,5 cm in mittleren Breiten, da hier sowohl zeitliche als auch räumliche Irregularitäten in der Verteilung des Wasserdampfes besser erfasst werden können. Numerische Wettermodelle sind auch grundsätzlich echtzeitfähig; in HERNÁNDEZ-PAJARES ET AL. [2006a] konnte gezeigt werden, dass die Genauigkeit bei Verwendung von Vorhersage- anstatt von (nicht in Echtzeit verfügbaren) Analyse-Feldern in den ersten Stunden nur sehr marginal abnimmt.

3.2.1.1 Blindes Modell „TropGrid“

Im Rahmen des GALILEO System Test Bed (GSTB-V1) wurde vom Institut für Erdmessung und Navigation der Universität der Bundeswehr in Kooperation mit dem Weltraumforschungs- und Technologiezentrum ESTEC der ESA das zukünftige Standard- Korrekturmodell für das europäische Satellitennavigationssystem GALILEO entwickelt (KRUEGER ET AL. [2004]). Hierbei wurde sowohl ein stationsspezifischer Ansatz

(TropSite) als auch ein gitterförmiger Ansatz (TropGrid) verfolgt. Da TropSite nur für den Einsatz von festen Bodenstationen, nicht aber für mobile Nutzer entwickelt wurde, wird auf diesen Ansatz hier nicht weiter eingegangen.

TropGrid setzt sich aus einem hydrostatischen und einem feuchten Korrekturmodell sowie einer klimatologischen Datenbank, die die für die Korrekturmodelle benötigten meteorologischen Parameter beinhaltet, zusammen. Diese drei Komponenten seien hier zusammen mit den relevanten Grundlagen vorgestellt.

Die totale troposphärische Laufzeitverzögerung SPD (slant path delay) lässt sich nach DAVIS ET AL. [1985] in einen trockenen (hydrostatischen) und einen feuchten Anteil zerlegen und wird mit Hilfe einer Mappingfunktion in Zenitrichtung projiziert:

$$SPD = m_H(E) \cdot ZHD + m_W(E) \cdot ZWD \quad (3-12)$$

Den ZHD (zenith hydrostatic delay) erhält man durch Integration des hydrostatischen Refraktionsprofils, den ZWD (zenith wet delay) entsprechend durch Integration des feuchten Refraktionsprofils (SCHÜLER [2001]):

$$\begin{aligned} ZHD &= 10^{-6} \cdot \int_{h_0}^{\infty} N_H(h) \cdot dh \quad \text{mit } N_H = k_1 \cdot R_d \cdot \rho \\ ZWD &= 10^{-6} \cdot \int_{h_0}^{\infty} N_W(h) \cdot dh \quad \text{mit } N_W = \left(k_2' \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \right) \cdot Z_W^{-1} \end{aligned} \quad (3-13)$$

k_i : Refraktionskoeffizienten

R_d : Gaskonstante der trockenen Luft: 287,054 [J·kg⁻¹·K⁻¹]

ρ : Dichte der Luft [kg·m⁻³]

e : Partieller Wasserdampfdruck [hPa]

T : Temperatur [K]

Z_W^{-1} : Inverser Kompressionsfaktor für feuchte Luft [-]

Alternativ kann der ZHD ohne Genauigkeitseinbußen aus dem Saastamoinenmodell gewonnen werden (s. Formel (3-18)).

Zur Dichte ρ der Luft ist zu sagen, dass sie sich – analog zum Luftdruck – aus einem trockenen und einem feuchten Anteil zusammensetzt

$$\rho = \rho_d + \rho_w \quad \text{bzw.} \quad \rho = \rho_d + e \quad (3-14)$$

und folgender Zusammenhang zwischen der Dichte und dem Luftdruck besteht:

$$\rho_i = \rho_i \cdot R_i \cdot T \cdot Z_i \quad (3-15)$$

Die spezifischen Gaskonstanten R_d und R_w werden unter der Verwendung der jeweiligen molaren Massen berechnet, s. SCHÜLER [2001]. Für die Berechnung der Kompressionsfaktoren Z_d und Z_w sind in OWENS [1967] Formeln gegeben. Da aber deren Werte nahe 1 sind, können diese Faktoren im Folgenden vernachlässigt werden.

Für die Refraktionskoeffizienten k_1 , k_2' und k_3 findet man in der Literatur unterschiedliche Werte. Für das TropGrid Modell wurden in Anlehnung an BEVIS ET AL. [1994] die folgenden Werte verwendet:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= 77,60 \pm 0,09 \text{ K/hPa} \\
 k'_2 &= 22,1 \pm 2,2 \text{ K/hPa} \\
 k_3 &= 370100 \pm 1200 \text{ K}^2/\text{hPa}
 \end{aligned}$$

Da vor allem der Refraktionskoeffizient k_3 erheblich unterschiedliche Werte (368200 – 377400 K²/hPa) annehmen kann, wurde in SCHÜLER [2005] mit Hilfe aus GPS abgeleiteten totalen troposphärischen Laufzeitverzögerungen ZPD eine Validierung dieses Koeffizienten durchgeführt. Für 213 Stationen wurde jeweils k_3 bestimmt, mit dem folgenden Ergebnis:

Arithmetisches Mittel	370186
Median	372044
Mittlere Standardabweichung von k_3 einer Station	28939
Standardabweichung des Mittelwertes	1983

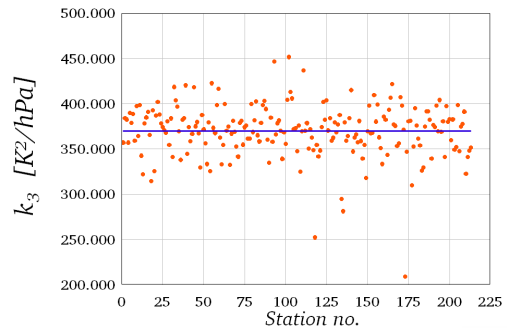


Abbildung 3-17: Validierung des Refraktionskoeffizienten k_3 mit Hilfe von GPS-Messungen, Quelle: SCHÜLER [2005]

Damit wurde gezeigt, dass der Wert von 370100 K²/hPa sich mit den Ergebnissen aus SCHÜLER [2005] deckt, wobei man berücksichtigen muss, dass für die Validierung zwar weltweit, aber nicht homogen verteilte IGS-Stationen verwendet wurden.

Aus (3-13) ist zu entnehmen, dass die Eigenschaften der Troposphäre durch die drei meteorologischen Parameter Luftdruck p , Temperatur T und relative Luftfeuchte RH beschrieben werden. Von diesen drei Parametern hängen auch die Korrekturmodelle ab, die in TropGrid verwendet werden. Diese modellieren die troposphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung, mit Hilfe einer Mappingfunktion werden diese in Richtung der Satelliten umgerechnet. Es kann entweder dieselbe Mappingfunktion für den hydrostatischen und den feuchten Anteil verwendet werden oder – wie bei TropGrid – zwischen einer hydrostatischen Funktion m_h und einer feuchten Funktion m_w unterschieden werden. TropGrid verwendet die Mappingfunktion von NIELL [1996], die auf dem Kettenbruchansatz von MARINI [1972] beruht. Der einfachere Ansatz $1/\cos z$ bzw. $1/\sin E$ kann nur troposphärische Laufzeitverzögerungen bis zu einer Elevation von ca. 20° (ROTHACHER [1992]) bzw. bei etwas höheren Genauigkeitsansprüchen nur bis zu einer Elevation von ca. 30° (SCHÜLER [2001]) ausreichend kompensieren, da bei niedrigeren Elevationen der troposphärische Einfluss im Vergleich zum ionosphärischen Einfluss noch mehr verstärkt wird. Der Ansatz von MARINI [1972]

$$m(E) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin E + \frac{a}{\sin E + \frac{b}{\sin E + c}}} \quad (3-16)$$

hingegen kann auch in horizontnahen Bereichen eingesetzt werden. Für die Mappingfunktion von NIELL [1996] werden die Koeffizienten a , b und c aus (3-16) mit trigonomet-

rischen Funktionen modelliert, die von der Breite φ und dem Tag des Jahres DoY abhängen. Für die hydrostatische Mappingfunktion wird eine trigonometrische Funktion verwendet, die die jährliche Variation widerspiegelt:

$$a(\varphi, DoY) = a(\varphi)_{MITTEL} - a(\varphi)_{AMPLITUDE} \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{DoY - DoY_0}{365,25}\right) \quad (3-17)$$

φ : Breite der Station

DoY : Tag des Jahres

DoY_0 : Tag des Jahres für den "maximalen Winter"; für die nördliche Hemisphäre auf 28 und für die südliche Hemisphäre auf 211 fixiert.

Des Weiteren erfolgt eine Höhenkorrektur. Für die feuchte Mappingfunktion wird hingegen nur ein Mittelwert verwendet, es erfolgt auch keine Höhenreduktion der Koeffizienten. Die Koeffizienten für den Mittelwert, Amplitude und Höhenkorrektur sind für sechs Breitenzonen (kein Unterschied zwischen nördlicher und südlicher Hemisphäre) gegeben, sie sind in NIELL [1996] oder SCHÜLER [2001] zu finden.

Die hydrostatische Laufzeitverzögerung hängt, wie schon erwähnt, hauptsächlich vom an der GPS-Antenne gemessenen Luftdruck ab. In TropGrid wird für die Modellierung des ZHD das Modell von SAASTAMOINEN [1972] verwendet, womit man nach SCHÜLER [2001] folgende Beziehung für die hydrostatische Laufzeitverzögerung erhält:

$$ZHD = \frac{0,0022767 \left[\frac{m}{hPa} \right] \cdot p}{1 - 0,00266 \cdot \cos 2\varphi - 0,00028 \left[\frac{1}{km} \right] \cdot h} \quad (3-18)$$

φ : Breite der Station

h : Ellipsoidische Höhe [km]

p : Luftdruck [hPa]

Dieses Modell zeichnet sich durch eine hohe Genauigkeit aus. Es ist hauptsächlich durch Unsicherheiten im Wert für den Luftdruck, der aber i.A. sehr gut präzifizierbar oder messbar ist, limitiert, so entspricht 1 hPa Unterschied im Luftdruck ca. 2 mm Unterschied im ZHD.

Dahingegen ist es weitaus schwieriger die feuchte troposphärische Laufzeitverzögerung – den ZWD – zu modellieren. Dieser hängt von der Temperatur und dem partiellen Wasserdampfdruck entlang des gesamten Weges durch die Troposphäre ab. Es ist möglich, Modelle zu verwenden, die auf Oberflächenmessungen beruhen und eine bestimmte Verteilung der Parameter in der Troposphäre annehmen. Eine höhere Genauigkeit erreicht man aber, wenn man Kenntnisse über die Verteilung von Temperatur und Feuchte in der gesamten Troposphäre hat, also z.B. das gesamte feuchte Refraktivitätsprofil aufintegriert. Daher wurde ein neues ZWD-Modell entwickelt, das auf physikalischen Prinzipien beruht und von drei meteorologischen Parametern abhängt: dem partiellen Wasserdampfdruck an der Oberfläche e_0 , dem Gradienten des partiellen Wasserdampfdrucks λ und der mittleren Temperatur der Troposphäre T_M (KRUEGER ET AL. [2004]).

Hierzu wird angenommen, dass der partielle Wasserdampfdruck in gleicher Weise mit der Höhe abnimmt wie der Druck (ASKNE UND NORDIUS [1987]):

$$\frac{e}{e_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\lambda+1} \quad (3-19)$$

- e : Partieller Wasserdampfdruck in einer Höhe H [hPa]
 e_0 : Partieller Wasserdampfdruck in einer Höhe H_0 [hPa]
 p : Luftdruck in einer Höhe H [hPa]
 p_0 : Luftdruck in einer Höhe H_0 [hPa]
 λ : Dimensionslose Abnahmerate des Wasserdampfdrucks

Die mittlere (gewichtete) Temperatur der Troposphäre ist nach ASKNE UND NORDIUS [1987] definiert durch:

$$T_M = \frac{\int_{H_0}^{\infty} \frac{e}{T} \cdot dH}{\int_{H_0}^{\infty} \frac{e}{T^2} \cdot dH} \quad (3-20)$$

Nimmt man für den ZWD Formel (3-13), erhält man unter Verwendung von (3-19) und (3-20) das Modell für den feuchten Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung:

$$ZWD = 10^{-6} \cdot \frac{k_3}{T_M} \cdot \frac{R_d}{g_m} \cdot \frac{e_0}{\lambda + 1} \quad (3-21)$$

- k_3 : Refraktionskoeffizient 370100 ± 1200 [$K^2 \cdot hPa^{-1}$]
 R_d : Gaskonstante der trockenen Luft: $287,054$ [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
 g_m : Gewichtete mittlere Erdbeschleunigung [$m \cdot sec^{-2}$]:
 $g_m = 9,784 \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot \left(1 - 0,00266 \cdot \cos 2\varphi - 0,00028 \left[\frac{1}{km} \right] \cdot h \right)$
 e_0 : Partieller Wasserdampfdruck an der Station [hPa]
 λ : Gradient des partiellen Wasserdampfdrucks [-]
 T_M : Mittlere Temperatur an der Station [K]

Somit ergeben sich folgende Berechnungsschritte für die totale troposphärische Laufzeitverzögerung in Richtung eines Satelliten an einer Station P bei Verwendung des TropGrid-Modells:

- Bestimmung der neun die Station P umgebenden Gitterpunkte
- Berechnung der feuchten Laufzeitverzögerung mit dem physikalischen Modell (Formel (3-21))
- Berechnung der trockenen Laufzeitverzögerung mit dem Modell von Saastamoinen (Formel (3-18))
- Horizontale Interpolation: die neun Stationen werden mit dem reziproken Abstand $1/s^2$ zur Station P gewichtet
- Umrechnung mit Hilfe der Mappingfunktion von Niell in Richtung des Satelliten

Die dazu notwendigen meteorologischen Parameter erhält man durch Interpolation aus einer $1^\circ \times 1^\circ$ Datenbank.

In dieser Datenbank sind die in Tabelle 3-2 aufgeführten meteorologischen Parameter enthalten. Alle Parameter werden mit einer jährlichen (saisonalen) Variation modelliert, einige von ihnen zusätzlich mit einer täglichen Variation.

Parameter	Jährliche Variation	Tägliche Variation
Temperatur T	✓	✓
Gradient der Temperatur β_T	✓	✗
Mittlere Temperatur T_M	✓	✓
Gradient d. mittleren Temperatur β_{T_M}	✓	✗
Luftdruck p	✓	✗
Partieller Wasserdampfdruck e	✓	✓
Gradient des Wasserdampfdrucks λ	✓	✗

Tabelle 3-2: Meteorologische Parameter von TropGrid

Um die mittlere Temperatur T_M auf Stationshöhe H zu reduzieren, wird der Temperaturgradient β_{T_M} verwendet. Analog wird bei der Reduktion der Temperatur T vorgegangen, die für die Reduktion des Luftdrucks benötigt wird (s. Formel (3-23)):

$$T_{M_H} = T_{M_0} + \beta_{T_M} \cdot (H - H_0) \quad (3-22)$$

T_{M_H} : Mittlere Temperatur für die Höhe H [K]

T_{M_0} : Mittlere Temperatur für die Höhe H_0 [K]

β_{T_M} : Gradient der mittleren Temperatur [$K \cdot km^{-1}$]

H, H_0 : Höhe [km]

Die Reduktionsformel für den Luftdruck p erhält man über die Gleichung für das hydrostatische Gleichgewicht (ideales Gasgesetz von Boyle und Mariotte), Formel (3-15) sowie Formel (3-22). Eine detaillierte Herleitung findet man in SCHÜLER [2001]:

$$p_H = p_0 \cdot \left(\frac{T_H}{T_0} \right)^{-\frac{g}{R_d \cdot \frac{\beta_T}{1000}}} \quad (3-23)$$

p_H : Druck für die Höhe H

p_0 : Druck an der Erdoberfläche

T_H : Temperatur für die Höhe H

T_0 : Temperatur an der Erdoberfläche

g : Erdbeschleunigung [$m \cdot sec^{-2}$]

R_d : Gaskonstante der trockenen Luft: $287,054 [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

β_T : Temperaturgradient [$K \cdot km^{-1}$]

Parameter mit nur einer jährlichen Variation wie bspw. der Luftdruck p werden mit der folgenden Funktion modelliert:

$$p = p_{MITTEL} + p_{AMPL} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365,25} \cdot (DoY - DoY_{WINTER})\right) \quad (3-24)$$

p : Luftdruck Druck

p_{MITTEL} : Mittlerer Wert für p

p_{AMPL} : Amplitude von p

DoY : Tag des Jahres (beginnend mit 1,0)

DoY_{WINTER} : Tag des „maximalen Winters“

Dabei ist zu beachten, dass im Gegensatz zur Mappingfunktion von Niell der Tag des maximalen Winters nicht fixiert ist, sondern für jeden Gitterpunkt separat geschätzt wurde.

Parameter mit einer jährlichen und einer täglichen Variation wie bspw. die Temperatur T werden folgendermaßen modelliert:

$$T = a + b \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{24} \cdot (H_D - c)\right) \quad (3-25)$$

a : Jährliche Variation

b : Amplitude der täglichen Variation

c : „Minimale“ Stunde des Tages (hängt von der jährlichen Variation ab)

H_D : Stunde des Tages

Die Parameter a , b und c werden wiederum mit einem mittleren Wert, einer Amplitude und dem Tag des maximalen Winters modelliert:

$$a = a_{MITTEL} + a_{AMPLI} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365,25} \cdot (DoY - DoY_{WINTER})\right) \quad (3-26)$$

Alle in Tabelle 3-2 aufgeführten meteorologischen Parameter mit ihren Koeffizienten a_{MITTEL} , a_{AMPLI} (für tägliche Variationen zusätzlich b_{MITTEL} , b_{AMPLI} , c_{MITTEL} , c_{AMPLI}) sowie DoY_{WINTER} wurden mittels einer Ausgleichung geschätzt. Als Beobachtungen gingen NCEP-Wettermodell-Daten (Details zu diesen Wettermodellen in Kapitel 3.2.1.2) von 3,5 Jahren (Mitte 1999-Ende 2002) ein. Hierzu wurden nicht die originalen Wettermodelldaten verwendet, sondern so genannte TROPEX-Daten. Dies sind Daten in einem von SCHÜLER [2001] entwickelten, plattformunabhängigen Format (TROpospheric EXchange Format), die an die Bedürfnisse der Satellitennavigation angepasst sind. Es handelt sich hierbei nicht mehr um dreidimensionale, sondern um zweidimensionale Daten, d.h. auf einem $1^\circ \times 1^\circ$ Gitter werden alle meteorologischen Oberflächenwerte, die entsprechenden Gradienten sowie die entlang des Refraktivitätsprofils integrierten troposphärischen Laufzeitverzögerungen (getrennt nach hydrostatischem und feuchtem Anteil) in Zenitrichtung abgespeichert.

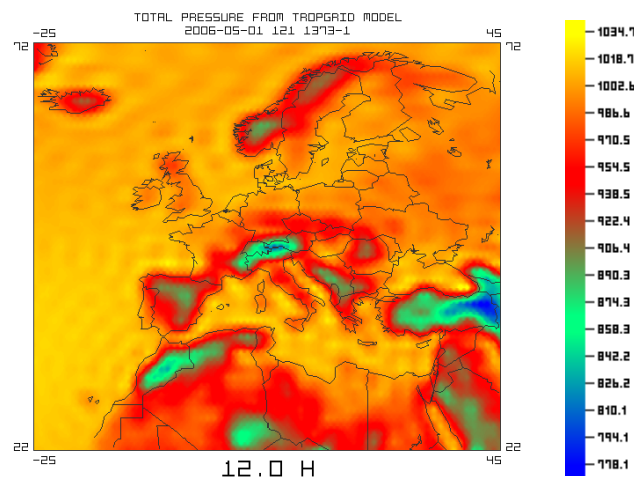


Abbildung 3-18: Druck [hPa] aus TropGrid für Frühjahr

In Abbildung 3-18 sieht man die Luftdruckverteilung in Europa und Teilen Nordafrikas um 12 Uhr mittags (UT), generiert aus der TropGrid-Datenbank. Der Luftdruck hängt primär nur von der Stationshöhe ab, die jahreszeitliche Variation ist eher gering. Da das TropGrid-Gitter sich nicht auf eine mittlere Meereshöhe o.ä. bezieht, sondern auf die Erdoberfläche an den einzelnen Gitterpunkten, erkennt man in Abbildung 3-18 sehr gut die Höhenabhängigkeit des Luftdrucks (so sieht man die Alpen in Mitteleuropa oder

das Atlasgebirge in Marokko).

In Abbildung 3-19 sieht man die Temperaturverteilung an der Erdoberfläche in Europa und Teilen Nordafrikas im Laufe der Jahreszeiten jeweils um 12 Uhr mittags (UT). Die Abbildung links oben zeigt einen Tag im Winter (1. Februar), rechts oben einen Tag im Frühjahr (1. Mai), links unten einen Tag im Sommer (1. August) sowie rechts unten einen Tag im Herbst (1. November). Auch ohne die schwarzen Konturen würde man die Wasser-/ Landgrenze relativ gut erkennen können, so ist im Winter gut der Kontrast zwischen dem durch den Golfstrom warmen Atlantik und dem kalten Binnenland von Norwegen und Schweden zu beobachten.

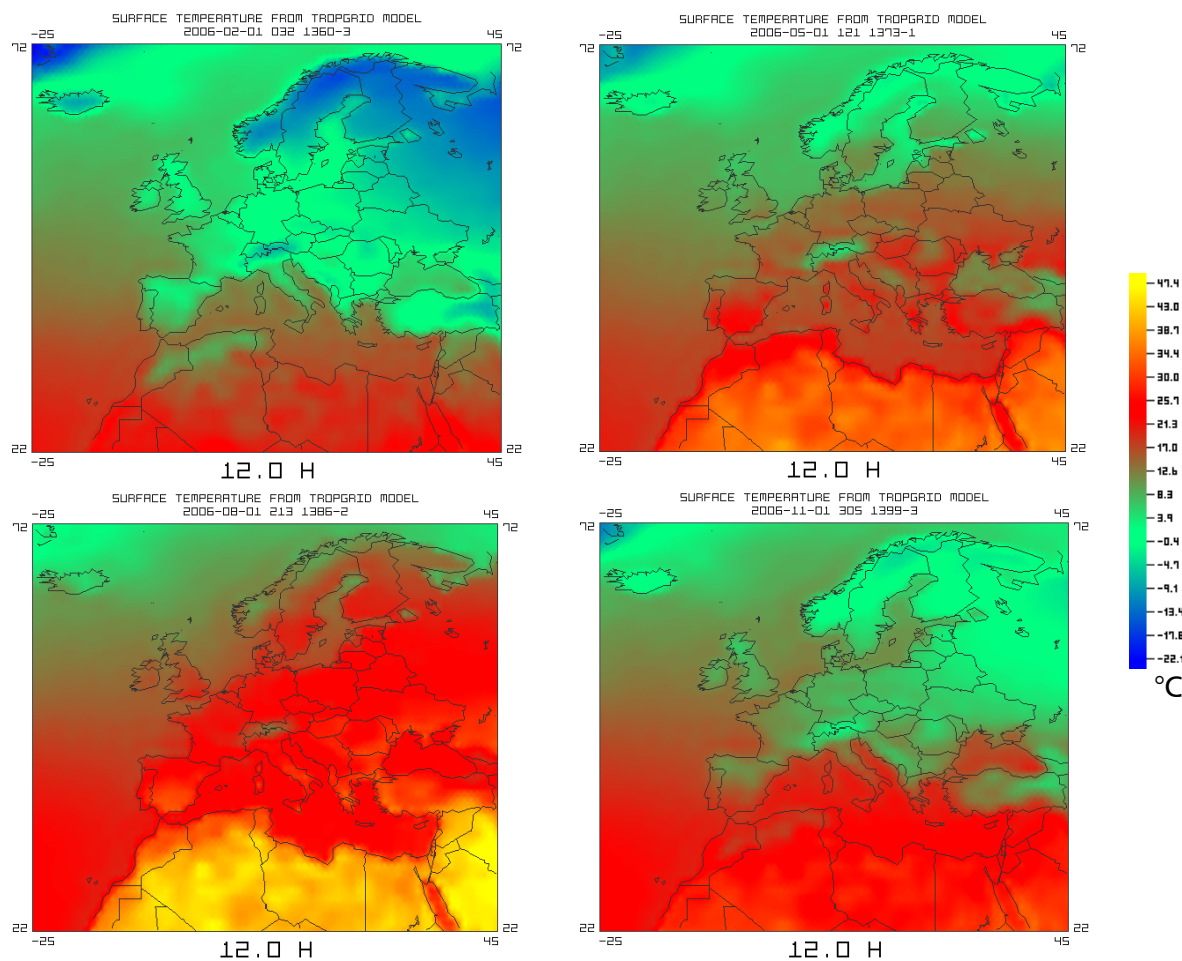


Abbildung 3-19: Temperatur [°C] von TropGrid im Laufe der Jahreszeiten jeweils um 12 h

Der feuchte Teil der troposphärischen Laufzeitverzögerung ist in Abbildung 3-20 ebenfalls für die vier Jahreszeiten um 12 Uhr mittags (UT) dargestellt. Man sieht die primäre Abhängigkeit von der Jahreszeit – wärmere und feuchtere Atmosphäre im Sommer, kältere und trockenere Atmosphäre im Winter –, aber auch eine leichte Abhängigkeit von der Höhe, recht gut zu erkennen in den Alpen und im Atlasgebirge.

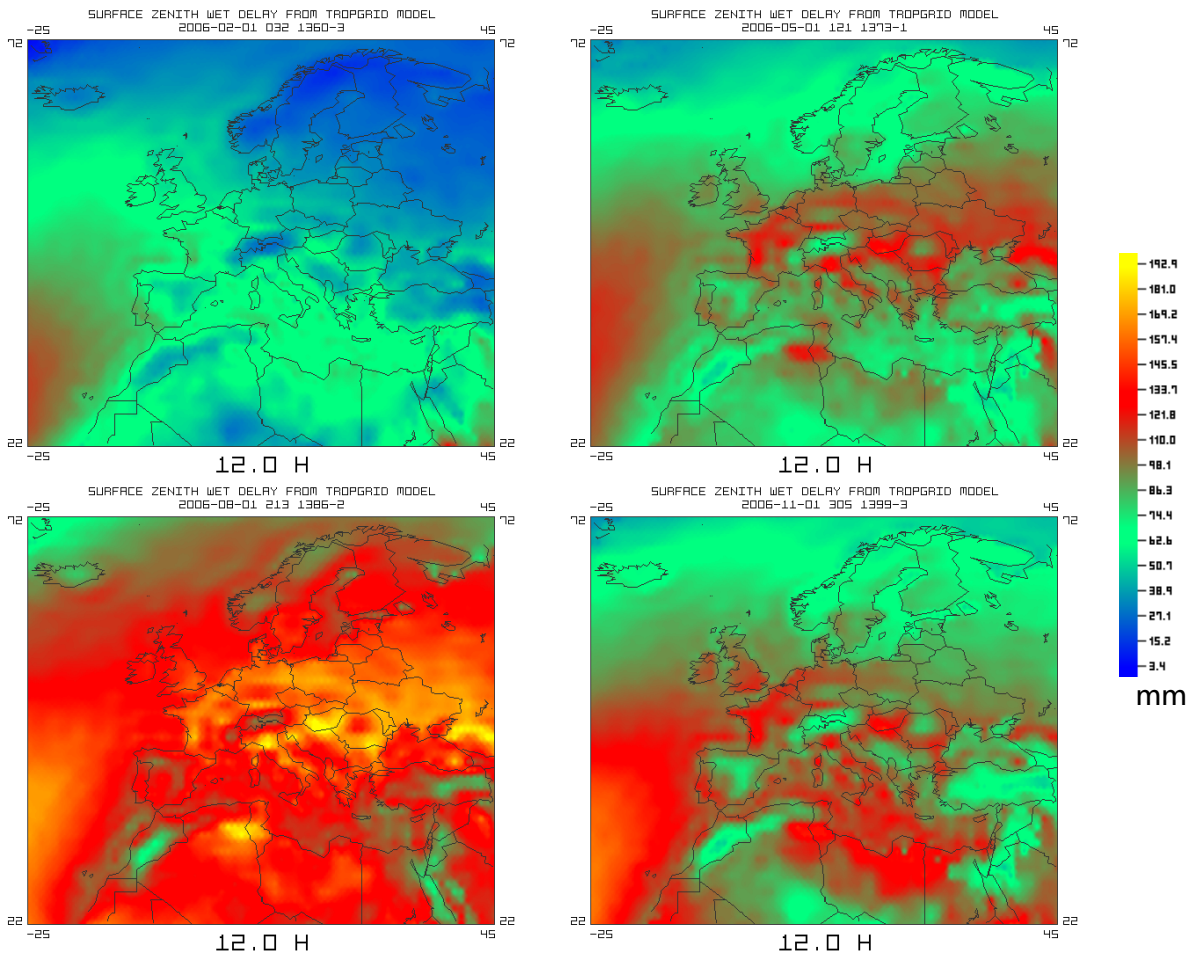


Abbildung 3-20: ZWD [mm] von TropGrid im Laufe der Jahreszeiten jeweils um 12 Uhr

3.2.1.2 Numerisches Wettermodell

Das US-amerikanische nationale Zentrum für Umweltvorhersagen (National Centre for Environmental Prediction NCEP), eine nachgeordnete Behörde der NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) betreibt das „Global Data Assimilation

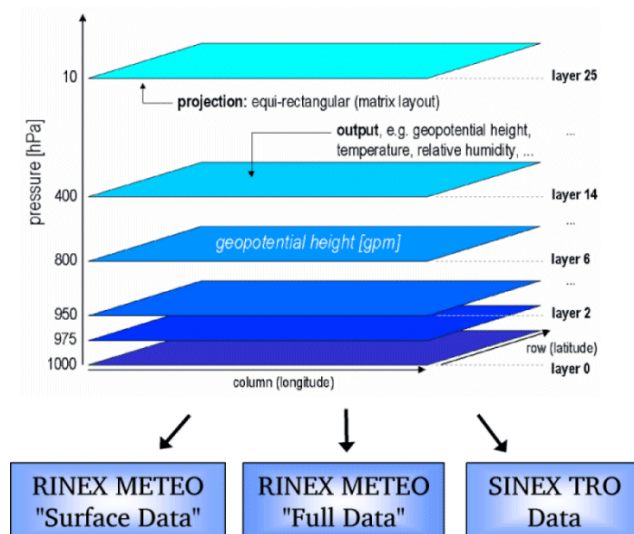


Abbildung 3-21: Numerisches Wettermodell NCEP sowie daraus abgeleitete Produkte

System“ (GDAS), ein globales numerisches Wettermodell (NWM) mit einer Auflösung von $1^\circ \times 1^\circ$. Alle 6 Stunden werden endgültige Analysen sowie dreistündige Vorhersagen herausgegeben, so dass dem Nutzer Wettermodelle mit einer zeitlichen Auflösung von drei Stunden zur Verfügung stehen. Dieses Wettermodell verfügt in den Ausgabefeldern über 26 vertikale Layer mit einem festen Luftdruckwert (dieser reicht von 10 hPa bis 1000 hPa) und dazugehöriger geopotentieller Höhe, Temperatur und relativer Feuchte (dieser Wert endet bei dem 100 hPa Layer). Nähere Angaben zu diesem Wettermodell, zum Verfahren der Datenextraktion, zeitlichen und räumlichen Interpolation sowie der Integration von Refraktivitätsprofilen finden sich in SCHÜLER [2001].

Aus diesem Wettermodell werden seit 1999 routinemäßig am Institut für Erdmessung und Navigation der Universität der Bundeswehr München für über 500 global verteilte Stationen drei Produkte abgeleitet (KRUEGER ET AL. [2004]):

- 1.) „Surface Data“: stündliche Daten für den Luftdruck, Temperatur und relative Feuchte; abgespeichert im Standard RINEX Format (Meteo)¹⁰.
- 2.) „Full Data“: stündliche Daten für den Luftdruck, Temperatur, relative Feuchte, mittlere Temperatur der Troposphäre, Gradient der trockenen und der mittleren Temperatur, Gradient des partiellen Wasserdampfdrucks, Höhe der Tropopause sowie der trockene und feuchte Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung (ZWD und ZHD), abgespeichert in einem erweiterten Standard RINEX Format (Meteo).
- 3.) „ZPD Data“: stündliche Daten des ZHD, ZWD sowie der totalen troposphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung ZPD (zenith path delay), abgespeichert im SINEX_TRO Format¹¹.

3.2.2 Relevante Phänomene

Extreme troposphärische Ereignisse bewirken weitaus geringere Veränderungen in der Laufzeitverzögerung als extreme ionosphärische Ereignisse. Trotzdem sollen an dieser Stelle Informationen über solche troposphärischen Extremereignisse sowie deren Einfluss auf die Positionierung zusammengestellt werden.

Troposphärische Extremereignisse sind immer mit dem Durchzug einer Front verbunden. Man unterscheidet hierbei zwischen einer Warmfront und einer Kaltfront. Nach

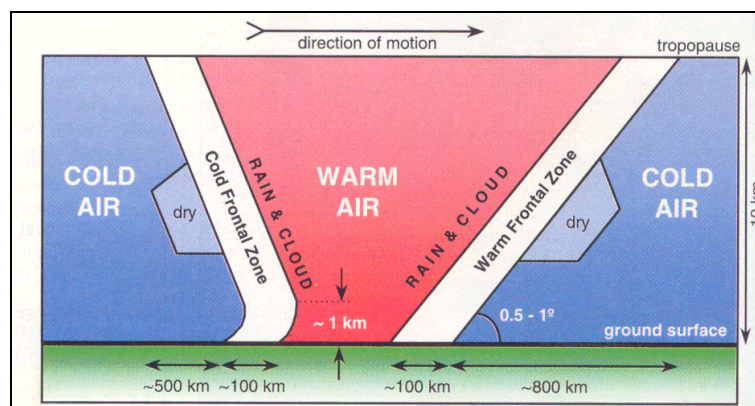


Abbildung 3-22: Querschnitt eines Systems mit zwei Fronten; die Dimensionen der Fronten sind nur grobe Näherungen, sie können von Front zu Front stark variieren; Quelle: GREGORIUS UND BLEWITT [1998]

¹⁰ Formatbeschreibung ist unter <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex210.txt> zu finden.

¹¹ Formatbeschreibung ist unter http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/sinex_tropo.txt zu finden.

GREGORIUS UND BLEWITT [1998] und MALBERG [2002] trennt eine Warmfront die Warmluft eines Tiefs von der vorgelagerten Kaltluft. Sie gleitet mit einer Neigung von nur ca. 1:150 (in Abbildung 3-22 mit 0,5 - 1° angedeutet) über die kalte Luft. Vor dem Durchzug einer Warmfront steigen Temperatur, Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchte ständig an, währenddessen der Luftdruck fällt. Bei der Passage der Warmfont steigt die Temperatur noch stärker an, der Luftdruck fällt jedoch nicht weiter. Kaltfronten sind mit einer Neigung von etwas 1:100 steiler als Warmfronten. Im Unterschied zu einer Warmfront können bei einer Kaltfront plötzlichere Änderungen auftreten. Im Vorfeld einer Kaltfront ändern sich jedoch die Temperatur, Druck und relative Luftfeuchte nur langsam. Während des Durchzugs einer Kaltfront fällt jedoch die Temperatur stark ab, die relative Luftfeuchte bleibt relativ hoch und der Luftdruck kann plötzlich absacken.

An einer IGS-Station in Südengland (Herstmonceux Castle) wurde für 14 Tage die troposphärische Laufzeitverzögerung im Zusammenhang mit dem Durchzug von Kalt- und Warmfronten beobachtet (GREGORIUS UND BLEWITT [1998]). In Abbildung 3-23 er-

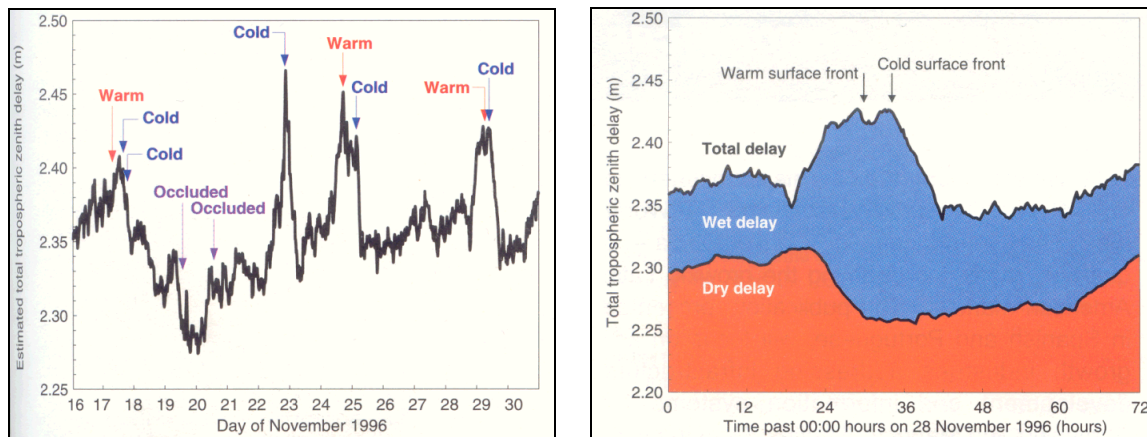


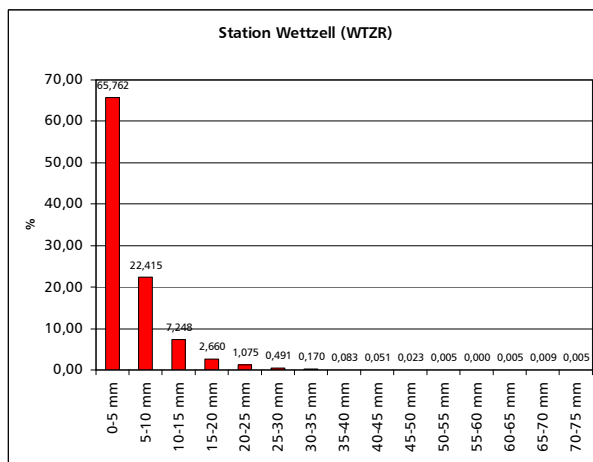
Abbildung 3-23: links: totale troposphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung, markiert ist jeweils der Durchzug einer Warmfront, Kaltfront oder Okklusion (Vereinigung einer Warmfront und einer nacheilenden Kaltfront); rechts: troposphärische Laufzeitverzögerung aufgeteilt in die trockene und feuchte Komponente; Quelle: GREGORIUS UND BLEWITT [1998]

kennt man, dass zwar bei Durchzug einer Front die troposphärische Laufzeitverzögerung sich stark verändern kann, dies geschieht jedoch immer noch über Stunden.

GREGORIUS UND BLEWITT [1998] verweisen auf einen Artikel in GPS World von Januar 1993¹², in dem gesagt wird, dass der feuchte Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung während des Durchzugs einer Front in einer Stunde durchaus um 3 cm variieren kann. Dieser Wert kann durch eigene Untersuchungen bestätigt werden. Es wurden für drei europäische IGS Stationen (WTZR, POTS und VILL) zweistündliche Differenzen des ZPD für den Zeitraum 2000-2004 berechnet, s. Abbildung 3-24 - Abbildung 3-26. Der ZPD wurde aus GPS-Messungen abgeleitet und ist im Standard SINEX_TRO Format via FTP für jedermann verfügbar¹³. Für ca. 85-88% der Zeit beträgt die Variation des ZPD über 2 Stunden maximal 1 cm, für über 99% der Zeit maximal 3 cm in zwei Stunden. Variationen von 3 cm in einer Stunde, also 6 cm in 2 Stunden (man kann diese

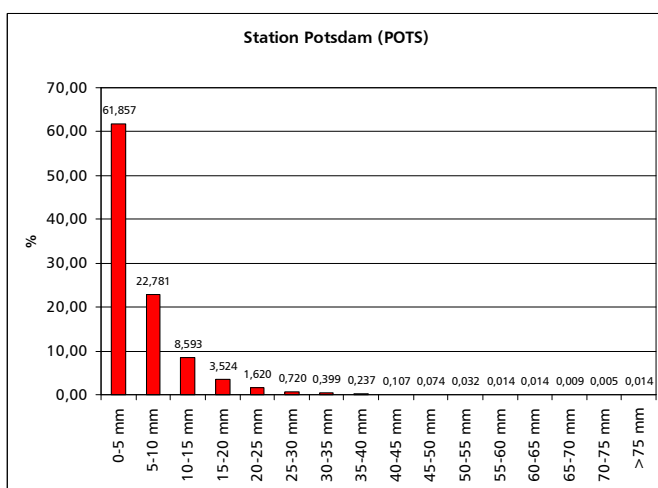
¹² BRUNNER, F.K., W.M. WELSCH [1993]: *Effect of the Troposphere on GPS Measurements*; GPS World, Vol. 4, No. 1, S. 42-51, Januar 1993.

¹³ <ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/igstrop/prod/wWWW/SSSSWWW.zpd>; dabei bezeichnet *WWW* die GPS-Woche und *SSSS* die Station.



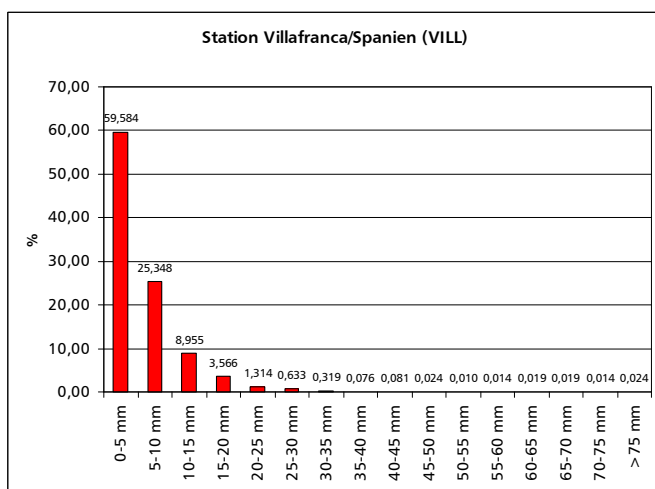
Bereich	Anzahl
0-5 mm	14317
5-10 mm	4880
10-15 mm	1578
15-20 mm	579
20-25 mm	234
25-30 mm	107
30-35 mm	37
35-40 mm	18
40-45 mm	11
45-50 mm	5
50-55 mm	1
55-60 mm	0
60-65 mm	1
65-70 mm	2
70-75 mm	1

Abbildung 3-24: Zweistündlicher Unterschied des ZPD, abgeleitet aus GPS-Messungen auf der Station WTZR über fünf Jahre (2000-2004)



Bereich	Anzahl
0-5 mm	13324
5-10 mm	4907
10-15 mm	1851
15-20 mm	759
20-25 mm	349
25-30 mm	155
30-35 mm	86
35-40 mm	51
40-45 mm	23
45-50 mm	16
50-55 mm	7
55-60 mm	3
60-65 mm	3
65-70 mm	2
70-75 mm	1
>75 mm	3

Abbildung 3-25: Zweistündlicher Unterschied des ZPD, abgeleitet aus GPS-Messungen auf der Station POTS über fünf Jahre (2000-2004)



Bereich	Anzahl
0-5 mm	12515
5-10 mm	5324
10-15 mm	1881
15-20 mm	749
20-25 mm	276
25-30 mm	133
30-35 mm	67
35-40 mm	16
40-45 mm	17
45-50 mm	5
50-55 mm	2
55-60 mm	3
60-65 mm	4
65-70 mm	4
70-75 mm	3
>75 mm	5

Abbildung 3-26: Zweistündlicher Unterschied des ZPD, abgeleitet aus GPS-Messungen auf der Station VILL über fünf Jahre (2000-2004)

Extrapolation guten Gewissens durchführen, da man in Abbildung 3-23 sieht, dass eine starke Zu- oder Abnahme des ZPD über mehrere Stunden erfolgt), treten je nach Region nur 1-3 mal pro Jahr auf, so dass man dabei von troposphärischen Extremereignissen sprechen kann.

Zu Problemen können diese troposphärischen Extremereignisse vor allem dann werden, wenn man wie bei der schnellen präzisen Positionierung doppelte Differenzen bilden muss. So kann eine Wetterfront auf der einen Station schon durchgezogen sein, aber auf der zweiten Station gerade erst ankommen. In HUANG UND V. GRAAS [2006] und AHN ET AL. [2006] wurde untersucht, wie sich extreme Wetterverhältnisse auf die GPS-Positionierung auswirken. So hat HUANG UND V. GRAAS [2006] für Basislängen zwischen 5,4 und 16,4 km die einfach differenzierte troposphärische Laufzeitverzögerung während der Passage einer Wetterfront bestimmt. Bei einer Basislinienlänge von 5,4 km erreichte diese maximal einen Wert von 0,4 m, bei einer Basislinienlänge von 16,4 km einen Wert von 0,57 m. Unter normalen Wetterbedingungen beträgt die einfach differenzierte troposphärische Laufzeitverzögerung wenige cm, bei Verwendung entsprechender Korrekturmodelle noch weniger (gleiche Stationshöhe vorausgesetzt!).

4 Aktives Referenznetzwerk

Bevor die eigentliche RTK-Positionierung des Nutzers („Rover“) in Kapitel 5 beschrieben wird, erfolgt hier zunächst die Darstellung von GNSS-Referenznetzwerken sowie die Beschreibung der Methoden, um die Daten dieser Stationen leistungssteigernd für die Rover-Positionierung zu nutzen.

Nach einer Einführung und allgemeinen Darstellung der Methoden – Korrekturansätze sowie Übertragungskonzepte – wird die Funktionsweise des Moduls NEREUS (GNSS Network Analyzer for Kinematic Users) detailliert beschrieben, das als Bestandteil des Pakets „PrePos GNSS Suite“ zur Ableitung von atmosphärischen Korrekturdaten entwickelt wurde.

4.1 Grundsätzliches

Den Begriff „aktives Referenznetzwerk“ findet man in der englischsprachigen Literatur. Man versteht darunter ein Netzwerk von GNSS Referenzstationen, deren Daten dazu genutzt werden, um atmosphärische (getrennt nach Ionosphäre und Troposphäre) und ggf. auch Orbitkorrekturen zu berechnen. Diese Korrekturen werden dann von einem Nutzer-Empfänger (Rover) aktiv verwendet.

Im Gegensatz dazu steht der Begriff „Multi-Station Positioning“. Hierbei wird der Rover nicht wie bei der klassischen PDGPS (präzises differenzielles GPS) Positionierung an nur eine Referenzstation angebunden, sondern an mehrere Stationen. Dies heißt aber nicht zwingend, dass diese Referenzstationen bzw. dieses Referenznetzwerk aktiv zur Generierung von atmosphärischen Korrekturen herangezogen werden; es erfolgt lediglich eine Positionierung über mehrere Basislinien, womit man ggf. eine bessere Netzgeometrie erzielt. Dieser Ansatz wird z.B. in SCHÜLER [2006b] zur kinematischen Positionierung über sehr lange Entfernungen (bis zu 300 km) verwendet; die atmosphärischen Korrekturen werden jedoch maßgeblich aus externen Quellen herangezogen, die GPS-Referenzstationen liefern lediglich die benötigten Messdaten, aus ihnen werden aber keine Korrekturdaten abgeleitet.

Unter Verwendung aktiver Referenznetzwerke, d.h. unter Anbringung der damit erzeugten Korrekturdaten, kann selbstverständlich auch mehr als eine Referenzstation zur Positionierung verwendet werden. Es ist deshalb nicht immer eindeutig, ob nun der Begriff „Multi Station Positioning“ die Verwendung aktiv generierter Korrekturdaten einschließt oder nicht.

Aktive Referenznetzwerke wurden in den letzten Jahren von vielen Ländern eingerichtet. In Europa findet man z.B. in Deutschland das SAPOS[®]-System mit über 250 Stationen in einem Abstand von ca. 25 – 65 km (je nach Bundesland und entsprechender Bevölkerungsdichte, s. Abbildung 4-1 links). SAPOS[®] ist ein Gemeinschaftsprojekt der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV). Es werden folgende Dienste angeboten:

- SAPOS[®]-HEPS: Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service mit einer Lagegenauigkeit von 1-2 cm bzw. einer Genauigkeit von 2-6 cm in der Höhe
- SAPOS[®]-EPS: Echtzeit-Positionierungs-Service mit einer Genauigkeit von 0,5-3 m. Dieser Dienst wird aber zunehmend durch EGNOS – das europäische satellitengestützte DGPS-System – an Attraktivität verlieren.
- SAPOS[®]-GPPS/GHPS: Geodätischer Hochpräziser Positionierungs-Service mit 1 cm Genauigkeit; hierbei werden entweder „near online“ oder im Postprocessing RINEX-Daten der Referenzstationen zur Verfügung gestellt.

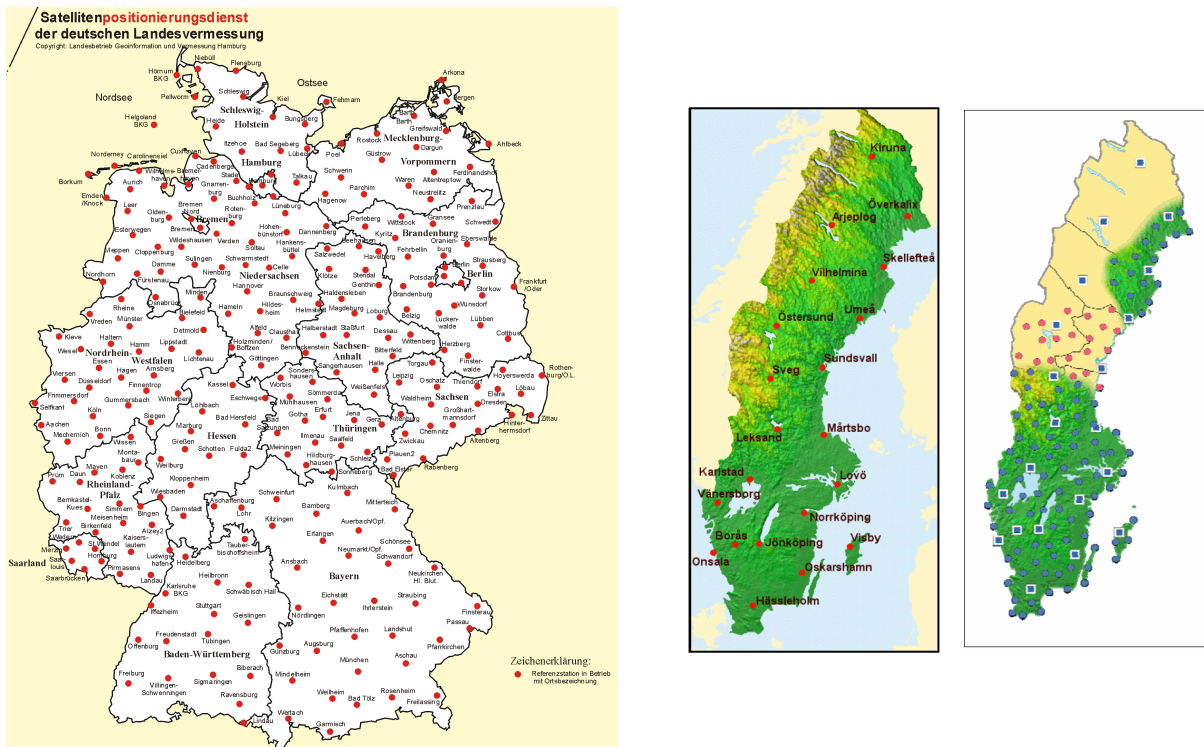


Abbildung 4-1: links: Referenzstationen des deutschen Satellitenpositionierungsdienstes SAPOS[®] der deutschen Landesvermessung¹⁴; rechts: Referenzstationen des schwedischen Satellitenpositionierungsdienstes SWEPOS, Quelle: JONSSON ET AL. [2006]

In der Schweiz bilden 30 GPS-Stationen des AGNES (Automatisches GPS Netz Schweiz) Netzes die Grundlage für den schweizerischen Positionierungsdienst *swipos*¹⁵.

In Schweden begann man 1994 mit dem Aufbau von 21 Referenzstationen mit einem Abstand von ca. 200 km, wie in Abbildung 4-1 Mitte dargestellt. Diese Stationen bestehen aus einem redundanten System mit Antennen auf konstant temperierten Pfeilern in anstehendem Gestein ohne nennenswerte Abschattungen. Um einen Netzwerk-RTK-Service anbieten zu können, wurde das Netz auf 120 Stationen mit einem mittleren Stationsabstand von ca. 70 km weiter verdichtet, s. Abbildung 4-1 rechts. Diese Stationen sind nicht redundant ausgestattet, die Antennen sind i.d.R. auf Gebäuden installiert (JONSSON ET AL. [2006]).

4.2 Einführung

4.2.1 Korrekturansätze

Es gibt verschiedene Ansätze, mit Hilfe von mehreren Referenzstationen ionosphärische, troposphärische sowie verbleibende Orbitfehler zu modellieren. FOTOPOULOS UND CANNON [2001] stellen drei unterschiedliche Ansätze gegenüber, die hier kurz vorgestellt werden.

Der klassische Ansatz unter Nutzung von partiellen Ableitungen, der auch in WANNINGER [2000] detailliert hergeleitet und untersucht wurde, benötigt mindestens drei Referenzstationen. Mit Hilfe dieser Stationen wird, wie in Abbildung 4-2 skizziert, eine Ebene aufgespannt, die den doppelt differenzierten ionosphärischen bzw. troposphäri-

¹⁴ Quelle: <http://fhh.hamburg.de/stadt/Aktuell/weitere-einrichtungen/landesbetrieb-geoinformation-und-vermessung/service/satelliten-positionierungsdienst/referenzstationen-gif,property=source.gif> (12.03.2007)

¹⁵ <http://www.swisstopo.ch/de/basics/geo/permnetworks/agnes/> (12.03.2007)

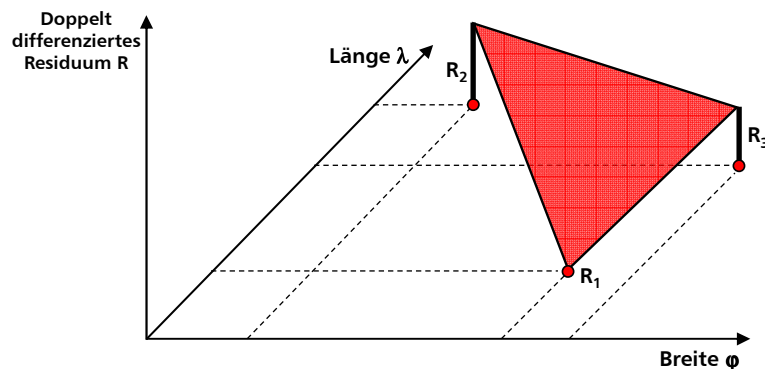


Abbildung 4-2: Zweidimensionale lineare Modellierung mit drei Referenzstationen

schen Restfehler modelliert, mehr Details s. Kapitel 4.4.1. Damit lässt sich für jede beliebige Roverposition innerhalb des Dreiecks über die Positionsdifferenz zu einer Referenzstation das entsprechende Residuum interpolieren; hierbei ist zu beachten, dass für jedes Satellitenpaar (doppelte Differenz) separat Koeffizienten für die Interpolation zu bestimmen sind. Bei Hinzunahme einer weiteren Station kann neben den beiden Horizontalgradienten für die Breite und Länge auch ein Vertikalgradient für die Höhe bestimmt werden. In FOTOPOULOS UND CANNON [2001] wird des Weiteren die Möglichkeit aufgezeigt, noch die zweite partielle Ableitung nach der Höhe mit zu modellieren, um die nichtlinearen Effekte der Ionosphäre und Troposphäre zu erfassen – vorausgesetzt es ist eine ausreichende Höhenvariation im Referenzstationsnetzwerk vorhanden. Nichtlineare Effekte in horizontaler Richtung können hingegen vernachlässigt werden.

Unter einer linearen Interpolation wird ein Gewichtsansatz verstanden, d.h. die doppelt differenzierten atmosphärischen Residuen am Rover werden durch den mit dem reziproken Abstand gewichteten Mittelwert zu allen Referenzstationen bestimmt. Dazu müssen dem Rover die Koordinaten aller Referenzstationen bekannt sein.

Der dritte Ansatz ist eine Ausgleichung mit Bedingungen, das so genannte Gauß-Helmert-Modell, ein Sonderfall der Ausgleichung unter Bedingungen (mehr dazu z.B. in JÄGER ET AL. [2005]). Dieser Ansatz lässt sich auch als Kollokation, ein vor allem aus der Geodäsie bekanntes Prinzip (Geoidbestimmung), auffassen. Nach Abspaltung eines Trends, worauf hier offenkundig verzichtet wurde, erfolgt die Separation eines Signals vom zufällig verteilten Rauschen. Die Prädiktion des Signals erfolgt mit Hilfe der stochastischen Modellierung, d.h. eine möglichst genaue Kovarianzfunktion, die die räumlichen und ggf. auch zeitlichen Abhängigkeiten der Fehlergrößen beschreibt, wird benötigt.

Um für möglichst viele Nutzer Korrekturen bereitstellen zu können, erfolgt eine Parametrisierung häufig als Oberflächenpolynom. Sie kann aber auch auf einem Gitternetz basieren, in dem dann bspw. über die vier nächsten Gitterpunkte beispielsweise bilinear interpoliert wird.

DAI ET AL. [2003] stellen ebenfalls einige Korrekturansätze – ein lineares Kombinationsmodell, eine entfernungsabhängige lineare Interpolation, Oberflächenpolynome erster und zweiter Ordnung sowie Kollokation – vor und vergleichen diese miteinander, indem sie ein Referenzstationsnetz in Australien mit einem Stationsabstand von ca. 50 km verwenden. Sie kommen zu dem Schluss, dass alle Ansätze die verbleibenden Restfehler für den Rover signifikant reduzieren, sich aber kein Ansatz durch eine besonders hohe Leistungsfähigkeit auszeichnet. WILLGALIS [2005] kritisiert allerdings, dass aufgrund der mathematischen, auf simulierten Daten beruhenden Untersuchungen alle aufgeführten Interpolationsansätze zu gleichwertigen Ergebnissen führen.

Nun stellt sich die Frage, welcher Ansatz für diese Arbeit verwendet wird. Grundsätzlich kommen der Gradientenansatz sowie die Kollokation in Frage. Folgende Gründe führen jedoch dazu, dass der Ansatz der Kollokation verworfen wird. So haben atmosphärische Korrekturen nicht nur eine räumliche, sondern auch eine starke zeitliche Abhängigkeit; das stochastische Verhalten (Dekorrelation) unterscheidet sich bei Durchzug eines Sturmgebietes fundamental von einer normalen Situation. Deutliche Unterschiede treten auch zwischen verschiedenen Einsatzgebieten wie Binnenland oder Küstenbereich auf. FORTES ET AL. [2003] beschreiben den Einsatz der Kollokation, wobei allerdings deutlich wird, dass optimale Ergebnisse nur mit einer individuell an das Messgebiet (und an die Messzeit) „getunte“ Kovarianzfunktion erzielt werden. In der Realität verfügt man aber nicht unbedingt über genügend präzise Kovarianzfunktionen, so dass entsprechend die Ergebnisse auch schlechter sein können. Ein weiteres Problem bei der Kollokation ist, dass das Signal nur wirksam separiert werden kann, wenn eine ausreichende Redundanz vorhanden ist, was aber Tendenzen einer Netzausdünnung zuwider läuft.

Aus den vorher genannten Gründen wird für diese Arbeit dem Gradientenansatz der Vorzug gegeben. Hierbei erfolgt die Modellierung als Flächenpolynom, wobei nicht nur lineare Terme verwendet werden, sondern auf Wunsch auch zusätzlich ein bilinearer Term oder ein Höhengradient berücksichtigt werden kann. Der verfolgte Ansatz ist jedoch abweichend von vorherrschenden Ansätzen kein reines Messmodell; es wird ein *à priori* Modell verwendet und über die GNSS-Messdaten lediglich noch der residuelle Fehler geschätzt. Auf diese Weise wird das reine Messmodell um eine Modellierung auf Grundlage der Atmosphärenphysik (z. B. Verwendung von NWM oder aber auch TropGrid für den troposphärischen Anteil) ergänzt. Für mehr Details sei hier auf Kapitel 4.4 verwiesen.

4.2.2 Übertragungskonzepte

4.2.2.1 Vergleich VRS – FKP

Im Echtzeitbetrieb wird in der Regel zwischen zwei Übertragungskonzepten unterschieden: Flächenkorrekturparameter (FKP) zusammen mit den Daten der nächstgelegenen Referenzstation sowie Daten einer virtuellen Referenzstation (VRS). Bei Nutzung von FKP werden am Rover unter Anbringung der Korrekturen doppelte Differenzen gebildet. Der Vorteil von FKP liegt darin, dass sie für eine größere Region, i.A. eine Dreiecksmasche, gelten und somit auch für sich schnell bewegende kinematische Nutzer anwendbar sind.

Dagegen sind Rohdaten für eine virtuelle Referenzstation inzwischen recht populär geworden. Dabei handelt es sich um künstliche Daten, die mit Hilfe der Korrekturdaten für eine fiktive Referenzstation in der Nähe des Nutzers „verfälscht“ werden, und somit weitestgehend realen Messdaten entsprechen. Der Vorteil für diesen Korrekturansatz ist, dass z. B. weiterhin Software genutzt werden kann, die auf die Positionierung über kurze Basislinien ausgelegt ist, jedoch muss spätestens mit der Nutzung von GALILEO die Software sowieso aktualisiert werden. Ein weiterer Vorteil ist das etwas geringere Datenübertragungsvolumen. Ein klarer Nachteil besteht jedoch für sich schnell bewegende Nutzer, für die immer wieder eine neue VRS (oder gar ein Gitter von virtuellen Referenzstationen) erzeugt werden muss.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird nur das Konzept der FKP weiter berücksichtigt. Dieser Ansatz ist sowohl im Programm NEREUS (s. Kapitel 4.3 und folgende Unterkapitel) als auch im Programm SEMIKA (s. Kapitel 5) implementiert. Jedoch muss die

Positionierung des Rovers nicht zwingend nur über Anbindung an eine Station erfolgen, es können auch mehrere Basislinien gleichzeitig ausgewertet werden.

Der Ansatz einer VRS ist mathematisch vom Ergebnis her in unserem Fall äquivalent, da hier die Korrekturansätze für die Atmosphäre direkt an die Rohdaten einer Referenzstation angebracht werden und eine gleichartige Modellierung für FKP- und VRS-Datengenerierung verwendet werden würde. Damit muss dieser Ansatz nicht separat untersucht werden.

4.2.2.2 Master-Auxiliary-Konzept MAC

Das Master-Auxiliary-Konzept (engl. master-auxiliary-concept MAC) ist ein neuerer Ansatz mit maximaler Flexibilität für den Rover. Es ist u.a. in BROWN ET AL. [2005] und WANNINGER [2006] beschrieben. Zunächst werden die Beobachtungen auf allen Referenzstationen auf dasselbe Mehrdeutigkeitsniveau gebracht. Zum Rover werden dann die vollständigen Rohdaten und Koordinaten *einer* Referenzstation (Master Station) sowie Korrekptions- und Koordinatendifferenzen zur Masterstation aller weiteren Referenzstationen (auxiliary stations) übertragen, um das Datenvolumen gering zu halten. Bei diesem Konzept ist es dem Nutzer freigestellt, in welcher Form er die Korrektionen für seinen Standort anbringt und welche Referenzstationen er dafür verwendet. Er kann z.B. auch die Rohdaten aller Referenzstationen wiederherstellen.

In Abbildung 4-3 sind die drei Übertragungskonzepte – VRS, FKP und MAC – in Bezug auf die einzelnen Berechnungsschritte bei einer Zentrale, die das entsprechende Netzwerk betreibt, und dem Nutzer (Rover) noch einmal dargestellt.

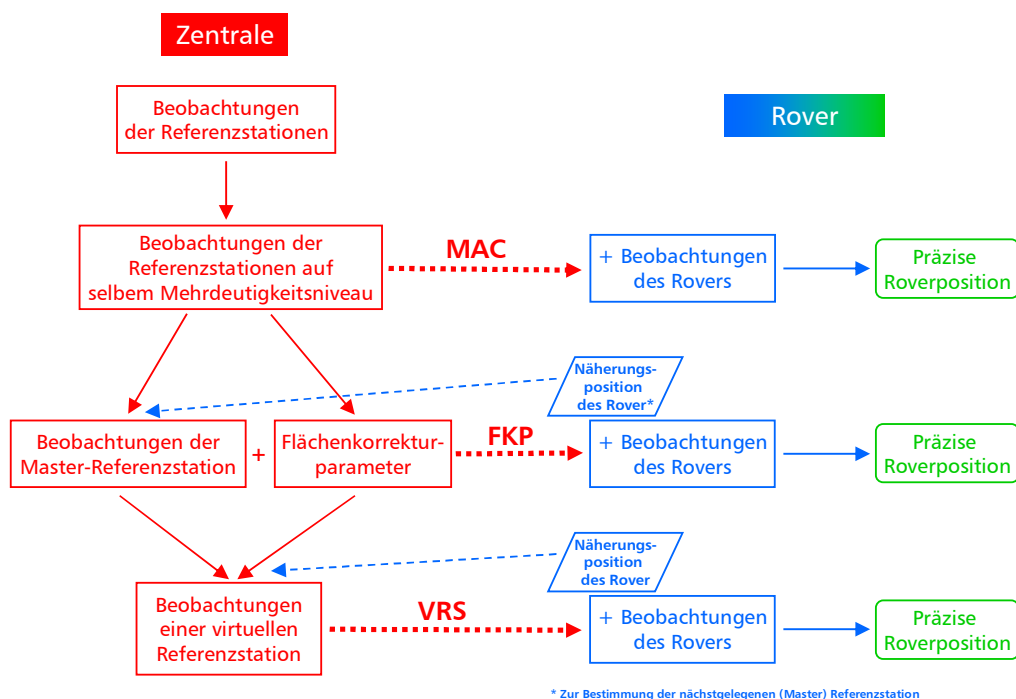


Abbildung 4-3: Zentrale und dezentrale (Rover) Berechnungsschritte bei Nutzung des Master-Auxiliary-Konzepts, von FKP und einer VRS

Weitere wichtige Unterschiede zwischen den drei Verfahren sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst. Die zur Verfügung gestellten Informationen und damit auch das notwendige Datenvolumen steigern sich von VRS über FKP bis zum MAC.

Konzept	Informationsgehalt	Datenvolumen	Verfügbarkeit der Netzkorrekturen	Datenformate	Netz-RTK Empfänger-Software
MAC	++	noch größer	bei Aufschaltung ggf. leicht verzögert	RTCM 3.0	ja
FKP	+	etwas größer	bei Aufschaltung ggf. leicht verzögert	RTCM 2.3, 3.0 + zusätzlicher Datensatz	ja
VRS	Minimum	Minimum	sofort	RTCM 2.3 oder 3.0	nein

Tabelle 4-1: Vergleich der Übertragungskonzepte nach WANNINGER [2006]

4.2.2.3 RTCM SC-104 Korrekturdatenformat

Um die Korrekturdaten möglichst vielen Nutzern zur Verfügung stellen zu können, muss deren Berechnung und das Format standardisiert werden. Bereits in den 80er Jahren hat die US-amerikanische Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) mit ihrer Arbeitsgruppe SC-104 (Special Committee 104 on Differential Global Navigation Satellite Systems DGNSS) einen ersten Standard verabschiedet. An diesen Standard halten sich alle Hersteller, und er hat somit auch außerhalb der USA weite Verbreitung gefunden.

Im Jahr 1985 wurde die RTCM Version 1.0 veröffentlicht. Aufgrund zwischenzeitlich gewonnener Erfahrungen führte dies 1990 zur wichtigen Version 2.0. Diese Version mit ihren Erweiterungen wird in Kapitel 4.2.2.3.1 detaillierter beschrieben. Anfang 2004 wurde ein neues, nicht abwärts kompatibles RTCM-Format veröffentlicht – mit den Versionen 3.0 und 3.1., die auch das MAC unterstützen, s. Kapitel 4.2.2.3.2. Im November 2004 wurde ein neues Transportprotokoll veröffentlicht, das das Versenden von Korrekturdaten über das Internet erlaubt, s. Kapitel 4.2.2.3.3.

4.2.2.3.1 RTCM Format Version 2.x

RTCM-Daten werden als kontinuierlicher binärer Datenstrom versendet, sie setzen sich aus unterschiedlichen Nachrichtentypen (messages), die sich, wie in Abbildung 4-4 dargestellt, aus einem Kopf (header) und einem Rumpf (body) zusammensetzen. Nicht jeder Nachrichtentyp muss in einem RTCM-Datensatz enthalten sein. Die Version 2.0 enthält alle notwendigen Informationen, um Korrekturdaten für DGPS-Anwendungen bereitzustellen, enthält aber keinerlei Informationen über Trägerphasen, so dass mit der Version 2.0 kein RTK möglich ist. Um notwendige Korrekturen für PDGPS-Anwendungen übertragen zu können, wurde die erweiterte Version 2.1 im Jahre 1993 veröffentlicht. Mit dieser Version können entweder Trägerphasen-Rohdaten (Nachrichtentyp 18) oder Trägerphasenkorrekturen (Nachrichtentyp 20) übertragen werden. Damit ist jedoch auch eine höhere Übertragungsrate von 9600 bps erforderlich (bei Version 2.0 waren es noch 1200 bps). Mit der Version 2.2 aus dem Jahr 1998 wurde auch die Nutzung von (P)DGLONASS ermöglicht. Im Frühjahr 2001 wurde dann die endgültige Version 2.3¹⁶ des RTCM-Standards veröffentlicht, in der u.a.

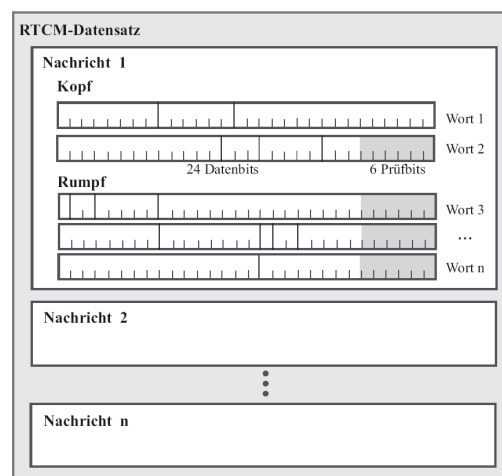


Abbildung 4-4: RTCM-Datensatz Version 2, Quelle: WILLGALIS [2005]

¹⁶ Formatbeschreibung für RTCM Recommended Standards for Differential GNSS, Version 2.3, RTCM Standard 10402.3 ist über <http://www.rtcn.org> erhältlich.

einige Klarstellungen getroffen wurden, die eine bessere Kompatibilität zwischen Implementationen verschiedener Hersteller gewährleisten sollen (BAGGE [2001], WILLGALIS [2005]).

Für den SAPOS[®]-EPS-Korrekturdienst, dem DGPS-Dienst, wird das RTCM-Format 2.0 verwendet; damit lässt sich eine Positionierungsgenauigkeit von ca. 1-3 m erreichen. Der SAPOS[®]-HEPS-Korrekturdienst verwendet für FKP und VRS weiterhin aus Kompatibilitätsgründen das RTCM-Format 2.3, zusätzlich dazu werden auch Korrekturdaten in der neuen Version 3.0 (VRS) bzw. 3.1 (MAC) (s. folgendes Kapitel) angeboten.

4.2.2.3.2 Das neue RTCM Format Version 3.x

Im Frühjahr 2004 wurde ein grundlegend neu entwickelter RTCM-Standard in der Version 3 veröffentlicht. Da die Vorgängerversion einige Unzulänglichkeiten aufwies wie ein ungünstiges Verhältnis von Prüf- zu Datenbits, zu geringe Integrität für bestimmte sicherheitsrelevante Anwendungen und eine begrenzte Anzahl von Datenfeldern, war diese Neuentwicklung notwendig geworden (KALAFUS UND V. DIERENDONCK [2003]).

Die Version 3 ist nach dem allgemein verbreiteten OSI-Schichtmodell aufgebaut. Die grundlegende Datenstruktur, die aus einer Präambel, einer Definition der Länge der Nachricht, der Nachricht selbst sowie CRC-Prüfbits besteht, ist Teil der Transportschicht. Die Nachrichten selbst sind mit einer variablen Länge von bis zu 1023 Bytes Teil der Präsentationsschicht. Die Reihenfolge der Felder in jeder Nachricht ist vorgegeben und deren Inhalte damit eindeutig, allerdings kann die Anzahl der nachfolgenden Felder variieren (KALAFUS UND V. DIERENDONCK [2003], WILLGALIS [2005]).

Für das RTCM Format der Version 3 liegen mittlerweile zwei Versionen vor, Version 3.0 und Version 3.1¹⁷. Die Version 3.0 unterstützt RTK-Anwendungen wie die Nutzung einer VRS. Die im Oktober 2006 veröffentlichte Version 3.1 dagegen unterstützt auch Netzkorrekturen, also das Master-Auxiliary-Konzept MAC.

ID	Nachrichtentyp	Version	
1001	L1 GPS RTK-Beobachtungsgrößen	3.0	
1002	Erweiterte L1 GPS RTK-Beobachtungsgrößen		
1003	L1/L2 GPS RTK-Beobachtungsgrößen		
1004	Erweiterte L1/L2GPS RTK-Beobachtungsgrößen		
1005	Stationäre RTK-Referenzstation ARP		
1006	Stationäre RTK-Referenzstation ARP mit Antennenhöhe		
1007	Antennenbeschreibung		
1008	Antennenbeschreibung mit Seriennummer		
1009-1012	GLONASS-RTK-Beobachtungsgrößen		
1013	Systemparameter		
1014	Network Auxiliary Stationen		zusätzlich in 3.1
1015	Ionosphärische Korrekturdifferenzen		
1016	Geometrische Korrekturdifferenzen		
1017	Kombinierte geom. und ionosph. Korrekturdifferenzen		
1019	Satellitenephemeriden		

Tabelle 4-2: Nachrichtentypen in der RTCM Version 3

Die für RTK-Anwendungen definierten Nachrichten sind in Tabelle 4-2 aufgeführt, eine detailliertere Beschreibung für die Nachrichtentypen 1001-1013 sind in KALAFUS UND V. DIERENDONCK [2003] zu finden.

¹⁷ Formatbeschreibung für RTCM Recommended Standards for Differential GNSS, Version 3.1, RTCM Standard 10403.1 ist über <http://www.rtcn.org> erhältlich.

4.2.2.3.3 Korrekturdaten über das Internet – Ntrip Version 1.0

Über das Internet können bereits seit mehr als zehn Jahren verschiedene GNSS-Daten heruntergeladen werden, auch Echtzeit-Datenströme wie z.B. das Internet Radio haben sich in den letzten Jahren durchgesetzt. Somit bietet es sich an, auch Echtzeit-GNSS-Korrekturdaten über das Internet zu vertreiben. Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) hat in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Kommunikationstechnik der Universität Dortmund ein http-basiertes Broadcaster-Konzept und das Kommunikationsformat Ntrip entwickelt (DETTMERING [2003], GEBHARD [2003]).

Die zu Grunde liegende Systemarchitektur, die sich aus drei Komponenten – Ntrip Server, Client und Caster – zusammensetzt, ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Jeder Datenquelle, also ein GNSS-Empfänger oder Beobachtungen aus einer Vernetzung, wird ein Ntrip Server zugeordnet, der die Daten an den Ntrip Caster weiterleitet. Autorisierte

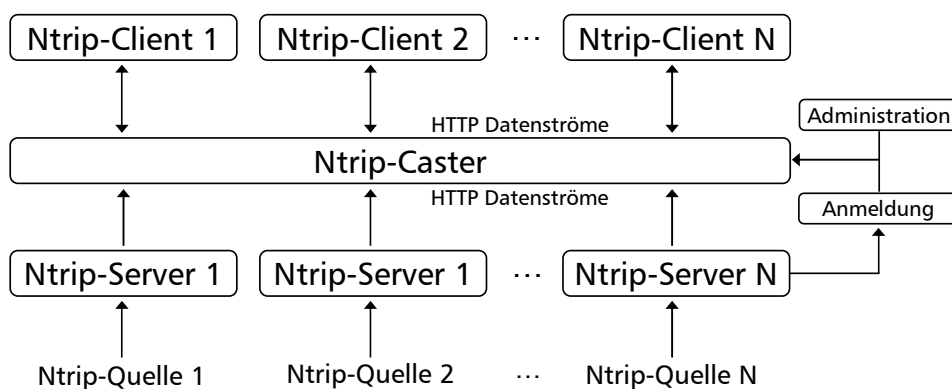


Abbildung 4-5: Ntrip-Konzept nach GEBHARD [2003]

Empfänger können nun alle verfügbaren Datenströme, die als Übersicht in Form einer „Source Table“ zur Verfügung stehen, vom Ntrip Caster abrufen. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten erfolgt über das standardisierte Ntrip Format, das im Jahr 2004 vom RTCM veröffentlicht wurde¹⁸.

Neben kode- und trägerphasenbasierten RTCM-Korrekturdaten können auch weitere Daten wie z.B. Rohdaten oder EGNOS-Korrekturdaten über einen Ntrip-Caster zur Verfügung gestellt werden. Ende 2005 wurden von ca. 35 Ntrip Castern Echtzeit-Daten von Referenzstationen oder VRS in verschiedenen Formaten zur Verfügung gestellt (WEBER ET AL. [2005]). Zur Zeit werden folgende Formate genutzt: GNSS-Empfänger-Rohdaten und RTK-Korrekturen (RTCM) mit 5 kbit/s, DGNSS-Korrekturen (RTCM) mit 0,5 kbit/s, DGNSS-Korrekturen (RTCA, EGNOS, WAAS) mit 0,1 kbit/s, Satellitenorbits (SP3) und RINEX-Daten mit 6 kbit/s sowie RTIGS-Daten (SOC-Format) mit 2 kbit/s. In Abbildung 4-6 sind alle im Jahr 2005 verfügbaren Ntrip GNSS-

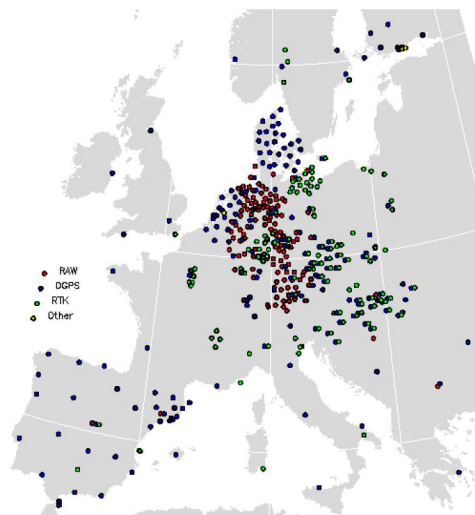


Abbildung 4-6: Ntrip GNSS-Datenströme in Europa, Quelle: WEBER ET AL. [2005]

¹⁸ Formatbeschreibung für RTCM Recommended Standards for Network Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip), Version 1.0, RTCM Standard 10410.0 ist über <http://www.rtcn.org> erhältlich.

Datenströme dargestellt. Es ist geplant, über Ntrip weitere Echtzeiten-Datenströme bereitzustellen, wie z.B. Informationen über die Ionosphäre und Troposphäre oder geodynamische Informationen.

4.3 Datenverarbeitung (NEREUS)

Dieser sowie die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die Datenaufbereitung der GNSS-Referenzstationsdaten im Modul NEREUS. Abschließend werden in Kapitel 4.6 ausgewählte Ergebnisse bzgl. der Korrekturgrößen und ihrer Genauigkeiten dargestellt. Dabei erfolgt aber hier zunächst eine Beschränkung auf GPS Zwei-Frequenzdaten aus echten Messungen, d.h. der gegenwärtige Stand der Technik wird dokumentiert.

NEREUS arbeitet ebenso wie das Modul SEMIKA, das zur schnellen statischen und kinematischen Positionierung verwendet wird (s. Kapitel 5), mit doppelten Differenzen. Die von NEREUS generierten atmosphärischen Korrekturen (Flächenkorrekturparameter) beziehen sich also unmittelbar auf das Messmodell dieser doppelten Differenzen und können von SEMIKA direkt weiterverarbeitet werden.

Doppelte Differenzen bieten bekanntlich den Vorteil, dass Satelliten- und Empfängeruhrfehler bei synchronisierten Messdaten wirksam eliminiert werden können. Des Weiteren können auf einfache Weise ganzzahlige Werte für die Mehrdeutigkeiten erzwungen werden. Neben weiteren Vorteilen sei hier noch folgender Vorteil erwähnt: bei einer vollkinematischen Positionierung mit ihren möglichen starken Änderungen der Antennenorientierung wirkt sich die auftretende Phasenverschiebung (engl.: phase wind-up) praktisch nicht aus und muss somit nicht aufwändig modelliert werden (KOUBA UND HÉROUX [2001]). Lediglich bei einer nicht mehr lotrecht ausgerichteten Antenne sollte diese nach KIM ET AL. [2006] berücksichtigt werden, da sie dann mit einer reduzierten Amplitude immer noch in Erscheinung tritt, aber zumeist nicht vom Mehrwege-Effekt getrennt werden kann. Jedoch werden „klassische“ RTK-Nutzer – sie arbeiten häufig im rapid-static Modus – immer auf eine lotrechte Antenne achten.

In den folgenden Unterkapiteln konzentriert sich die Darstellung der Datenverarbeitung vor allem bei grundlegenden, in der Literatur schon mehrfach sehr ausführlich behandelten Schritten auf die wesentlichen Aspekte. Für detailliertere Darstellungen sei auf WÜBBENA [1991], WANNINGER [2000], MISRA UND ENGE [2001], SCHÜLER [2001], SEEBER [2003], SCHÜLER [2006b] verwiesen.

4.3.1 Vorverarbeitung (Pre-Processing)

Die Daten-Vorverarbeitung umfasst im strengen Sinne alle Schritte bis zur Generierung der atmosphärischen Korrekturgrößen. Sie schließt auch die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten ein, die aber aufgrund ihrer besonderen Stellung im nächsten Unterkapitel separat behandelt wird.

Für die Prozessierung werden GNSS-Daten im RINEX-Format (entweder Version 2.10 für „klassische“ GPS 2-Frequenz-Messungen oder Version 3.0 (Entwurf), die auch GPS L5 bzw. GALILEO Daten berücksichtigt¹⁹) sowie dazugehörige Orbitdaten benötigt. Hierbei werden ausschließlich präzise Orbitdaten des IGS im SP3-Format²⁰ verwendet, um über genügend genaue Satellitenkoordinaten zu verfügen. Diese können zwar nicht für echte Echtzeitanwendungen verwendet werden, stattdessen würden sich Ultra-Rapid-

¹⁹ Entsprechende Formatbeschreibungen sind unter <http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/rinex210.txt> für Version 2.10 bzw. <http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/rinex300.pdf> für Version 3.0 zu finden.

²⁰ Formatbeschreibung s. http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/sp3_docu.txt bzw. für die erweiterte sp3c-Version <http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/sp3c.txt>.

Orbits anbieten, deren Orbitgenauigkeit schon fast an die Genauigkeit des präzisen Produktes heranreicht, siehe Tabelle 4-3.

IGS Produkt		Genauigkeit	Verfügbarkeit
Broadcast	Orbit	~ 160 cm	Echtzeit
	Satellitenuhren	~ 7 ns	
Ultra-Rapid (predicted half)	Orbit	~ 10 cm	Echtzeit
	Satellitenuhren	~ 5 ns	
Ultra-Rapid (observed half)	Orbit	< 5 cm	3 Stunden
	Satellitenuhren	~ 0,2 ns	
Rapid	Orbit	< 5 cm	17 Stunden
	Satellitenuhren	0,1 ns	
Final	Orbit	< 5 cm	~ 13 Tage
	Satellitenuhren	< 0,1 ns	

Tabelle 4-3: Übersicht über die vom IGS angebotenen Orbit-Produkte²¹

Des Weiteren werden zwingend Korrekturdaten zur Beschreibung der Variationen des Antennenphasenzentrums (engl. PCV – phase center variations) aller beteiligten Antennentypen benötigt. Diese PCV-Korrekturen werden in einen „Offset“ (Nord/Ost/Höhe) und in elevationsabhängige Anteile untergliedert; azimutabhängige Korrekturen werden standardmäßig gegenwärtig von den hier genutzten Dienstleistern²² noch nicht angeboten. Zu unterscheiden sind bei den PCV-Korrekturen relative (Korrekturen relativ zu einer Referenzantenne, i.d.R. Dorne-Margolin-Dipolen) und absolute Korrekturen; letztere sind ein neuerer Ansatz, der erst im November 2006 innerhalb des IGS eingeführt wurde.

Außerdem werden Erdorientierungsparameter EOP²³ (Berücksichtigung des Unterschieds zwischen mittlerem und momentanem Pol) benötigt, wobei bei Bedarf entsprechende sub-tägliche Effekte berücksichtigt werden. Für die Berechnung von Erdzeitenkorrekturen wird analog zu den IERS-Konventionen²⁴ vorgegangen. Zusätzlich können noch ozeanische Auflasten berücksichtigt werden. Dafür müssen für die entsprechenden Stationen Auflastkoeffizienten berechnet werden²⁵.

Vor der Schätzung der atmosphärischen Korrekturgrößen werden noch Korrekturen aus einem Standardmodell für die Ionosphäre bzw. Troposphäre angebracht. Für die Ionosphäre können entweder das Klobuchar-Modell (echtzeitfähig) oder IONEX-Karten des IGS (nur im Post-Processing) verwendet werden. Für die Troposphäre stehen im Wesentlichen das TropGrid-Modell und numerische Wettermodelle zur Verfügung, für Post-Processing können auch zuvor mit GPS ermittelte stationspezifische ZPD-Dateien verwendet werden.

Die eigentliche Prozessierung enthält somit im Wesentlichen folgende Schritte:

- **Netzwerkkonfiguration:** es wird eine „Bezugsstation“ (auch „Master“) gewählt; diese ist bei NEREUS grundsätzlich die Station mit den kürzesten Distanzen zu den anderen Stationen
- **Datenfilterung:** Elimination von Daten unterhalb der gewählten Elevationsmaske und von Daten mit zu schlechtem Signal-zu-Rausch-Verhältnis, u.ä.

²¹ Quelle: <http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>

²² insbesondere der US-amerikanische National Geodetic Survey NGS unter <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>

²³ zu finden auf <http://www.iers.org/MainDisp.csl?pid=36-25788&prodid=24> des IERS

²⁴ MCCARTHY, D.D. [1996]: *IERS Conventions*; IERS Technical Note No. 21; WWW: <http://maia.usno.navy.mil/conventions.html>.
MCCARTHY, D.D., PETIT, G. [2003]: *IERS Conventions (2003)*; IERS Technical Note No. 32; WWW: <http://www.iers.org/MainDisp.csl?pid=46-25776>.

²⁵ Die schwedische Chalmers Universität bietet unter <http://www.oso.chalmers.se/~loading/> einen entsprechenden Dienst an.

- Interpolation der Satellitenkoordinaten, Berücksichtigung der Satellitenezzenztrizität, ggf. Synchronisation der Daten
- Anbringen von Korrekturen und Reduktionen, die eine Änderung der Position bewirken: Antennenhöhenkorrektur, Antennenphasenzentrums-Offset, Erdzeiten, ggf. ozeanische Auflasten u.a.
- Anbringen von Korrekturen, die auf die Beobachtungen einwirken wie elevationsabhängige Phasenzentrumskorrekturen
- Berechnung der à priori Ionosphären- und Troposphärenkorrektur (à priori heißt, dass anschließend der Modellfehler über die GNSS-Daten relativ zum à priori Modell, also nur noch der residuelle Fehler geschätzt wird)
- Bestimmung des Referenzsatelliten („Master-Satellit“ mit maximaler Elevation)
- Bildung von doppelten Differenzen von den Stationen A und B zu den Satelliten i und j (s. Abbildung 4-7) für Kode- und Phasenbeobachtung,

$$\nabla\Delta PR_{AB}^j = (PR_B^i - PR_A^i) - (PR_B^j - PR_A^j) = \nabla\Delta\rho_{AB}^j + \nabla\Delta ION_{AB}^j + \nabla\Delta Trop_{AB}^j \quad (4-1)$$

$$\nabla\Delta\varphi_{AB}^j = (\varphi_B^j - \varphi_A^j) - (\varphi_B^i - \varphi_A^i) = \frac{\nabla\Delta\rho_{AB}^j}{\lambda} - \frac{\nabla\Delta ION_{AB}^j}{\lambda} + \frac{\nabla\Delta Trop_{AB}^j}{\lambda} - \nabla\Delta N_{AB}^j \quad (4-2)$$

die aufgrund der zuvor erfolgten Synchronisation der Messungen frei von Satelliten- und Empfängeruhrfehlern sind.

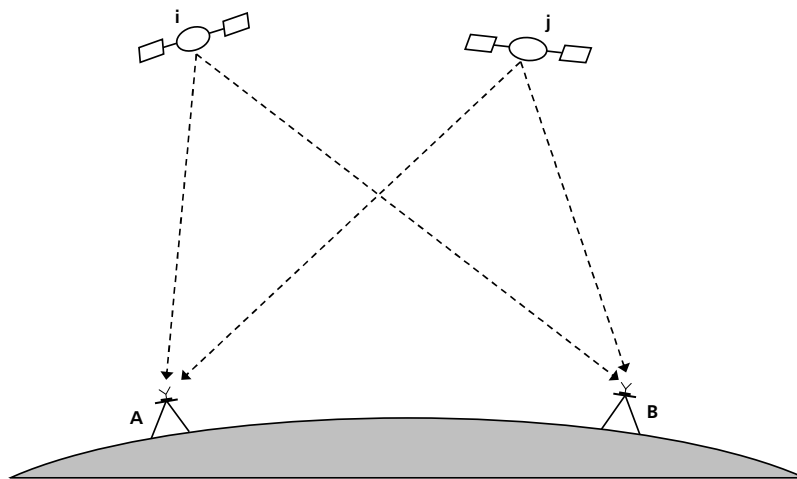


Abbildung 4-7: Empfänger-Satellit-Doppeldifferenz (Differenz der Empfänger-Einfachdifferenzen – Differenz der an zwei Empfängern A und B zeitgleich beobachteten Signale – zu zwei Satelliten i und j)

4.3.2 Fixierung der Mehrdeutigkeiten

Die Mehrdeutigkeitsfixierung ist sinnvoll zur Ableitung möglichst genauer Atmosphärenkorrekturen. Hierzu müssen zwingend die Mehrdeutigkeiten auf den Originalträgern (bei dem gegenwärtigen GPS also auf $L1$ und $L2$) gelöst werden, da nur dann Korrekturen für die Ionosphäre und die Troposphäre mit hoher Genauigkeit ermittelt werden können.

Das Verfahren der Mehrdeutigkeitslösung darf sich bei Referenzstationsnetzen deutlich vom Verfahren für (ggf. kinematische) Rover unterscheiden, da hier eine statische Problemstellung (mit zuvor bekannten, hochgenauen Stationskoordinaten) vorliegt und obendrein grundsätzlich über längere Zeiträume (d.h. kontinuierlich) beobachtet wird.

In NEREUS wurden zwei Ansätze implementiert:

- (a) Es werden verschiedene Linearkombinationen mit ganzzahligen Mehrdeutigkeiten verwendet, die aber trotzdem den Ionosphärenfehler in deutlich reduzierter Form enthalten (NIF).

(b) Klassischer Wide-Laning-Ansatz, bei dem eine Linearkombination mit großer virtueller Wellenlänge gebildet wird (WIF).

Der NIF-Ansatz kann auf Wunsch durch eine „troposphärische Referenzausgleichung“ (Tropospheric Reference Adjustment TORA) unterstützt werden, ein Suchverfahren, das auch zur Überprüfung der mit dem WIF-Ansatz fixierten Mehrdeutigkeiten angewendet wird.

Vor der Mehrdeutigkeitslösung erfolgt bereits das Testen auf möglicherweise vorhandene Phasensprünge, die – wenn möglich – repariert werden.

Die nachfolgende Beschreibung beschränkt sich im Gegensatz zur Rover-Positionierung auf Zweifrequenzdaten. Dazu sei in allgemeiner Hinsicht angemerkt, dass theoretisch Empfänger auf Referenzstationen auch in Zukunft nur Zwei-Frequenz-Systeme sein müssen, da dies zur wirksamen Bestimmung der Atmosphärenfehler bereits ausreicht. Auf diese Weise können Referenzstationsbetreiber Kosten einsparen, ohne die Nutzung von mehr als zwei Frequenzen durch den Rover einzuschränken (denn auf dem Rover muss nur der von der Frequenz abhängige ionosphärische Fehler entsprechend faktorisiert werden).

4.3.2.1 Näherungsweise ionosphärenfreie Linearkombinationen (NIF)

Es werden zwei Linearkombinationen verwendet, bei denen der noch enthaltene ionosphärische Fehler möglichst gering ist, d.h. der Faktor $\frac{ION_{ik}}{ION_{L1}}$ in den Tabellen im Anhang A sollte möglichst klein sein, die virtuelle Wellenlänge andererseits aber noch möglichst groß, um eine mögliche Fehlfixierung zu vermeiden. Um eine höhere Integrität dieses Verfahrens zu erzielen, können auf Wunsch auch vier Linearkombinationen verwendet werden.

Frequenzen	Linearkombinationen	zusätzliche Linearkombinationen
L1/L2	L_W und $L_{4,3}$	$L_{9,7}$ und $L_{5,4}$
L1/L5 (E1/E5a)	L_W und $L_{3,2}$	$L_{7,5}$ und $L_{4,3}$
E1/E6	L_W und $L_{2,1}$	$L_{5,4}$ und $L_{3,2}$

Tabelle 4-4: Näherungsweise ionosphärenfreie Linearkombinationen; zusätzliche Linearkombinationen werden für höhere Integrität verwendet

Für das gesamte Beobachtungsintervall (z.B. zwei Stunden) werden für jede Epoche die in Tabelle 4-4 aufgeführten Linearkombinationen gebildet. Die entsprechenden doppelt differenzierten Mehrdeutigkeiten werden nach ihrem Wert sortiert und der ganzzahlige Median-Wert – ein gegenüber Ausreißern robuster Schätzer – bestimmt. Die Streuung um den Median wird analysiert, d.h. innerhalb eines frei wählbaren Analysebereichs dürfen keine Mehrdeutigkeiten auftreten, die vom Wert des Medians abweichen (also um mindestens einen Zyklus), anderenfalls wird die Lösung verworfen. Der Analysebereich darf aber aufgrund der in der Praxis unvermeidlich vorhandenen Restfehler nicht zu hoch gewählt werden; i.d.R. sollte ein Schwellwert von 80% erreicht werden, also 80% der Mehrdeutigkeiten müssen mit dem Wert des Medians übereinstimmen.

Aus den fixierten Mehrdeutigkeiten N_{ab} und N_{cd} der Linearkombinationen können dann die Mehrdeutigkeiten für die beiden Trägersignale N_1 und N_2 berechnet werden:

$$\begin{aligned}
N_{ab} = a \cdot N_1 - b \cdot N_2 &\rightarrow N_1 = \frac{b \cdot N_{cd} - d \cdot N_{ab}}{b \cdot c - a \cdot d} \\
N_{cd} = c \cdot N_1 - d \cdot N_2 &N_2 = \frac{a \cdot N_{cd} - c \cdot N_{ab}}{b \cdot c - a \cdot d}
\end{aligned} \tag{4-3}$$

Bei der Verwendung von vier Linearkombinationen können sechs Paare mit jeweils zwei Linearkombinationen gebildet werden, so dass sechsmal Werte für N_1 und N_2 bestimmt werden. Diese müssen alle übereinstimmen, anderenfalls wird die Linearkombination mit dem geringsten Schwellwert verworfen. Sollten sich auch dann die Werte für N_1 und N_2 unterscheiden, ist eine Fixierung nicht möglich.

4.3.2.2 Troposphärische Referenzgleichung (TORA)

TORA ist eine Suchmethode, die zum Einsatz kommt, wenn die Mehrdeutigkeiten mit dem NIF-Ansatz nicht gelöst werden konnten. Die Methode wird beim WIF-Ansatz ergänzend (verifizierend) verwendet, da jener weniger eigene Mechanismen zur Verifikation der gefundenen ganzzahligen Mehrdeutigkeiten bietet.

Der prinzipielle Ansatz ist, dass mit Hilfe von GNSS-Messungen ermittelte (doppelt differenzierte) troposphärische Laufzeitverzögerungen mit gegebenen troposphärischen Referenzdaten übereinstimmen müssen. Als korrekt wird die Mehrdeutigkeitskombination N_1/N_2 angesehen, die am besten mit den Referenzdaten übereinstimmt. Voraussetzung für diesen Ansatz sind ausreichend genaue Referenzdaten; TropGrid reicht zumeist nicht aus, es sollten numerische Wettermodelldaten verwendet werden (oder im Post-Processing auch aus GNSS-Messungen abgeleitete ZPD-Werte).

Die gesamte doppelt differenzierte troposphärische Laufzeitverzögerung, die der ionosphärenfreien Linearkombination entspricht, setzt sich also aus einem Modellwert und einem Restanteil $\delta\nabla\Delta Trop$ zusammen:

$$\nabla\Delta Trop_{GESAMT} = \nabla\Delta Trop_{MODELL} + \delta\nabla\Delta Trop = \frac{\nabla\Delta\phi_1 - \frac{f_2}{f_1} \cdot \nabla\Delta\phi_2 - \frac{\nabla\Delta\rho_1}{\lambda_1} + \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{\nabla\Delta\rho_2}{\lambda_2} + \nabla\Delta N_1 - \frac{f_2}{f_1} \cdot \nabla\Delta N_2}{\frac{1}{\lambda_1} - \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{1}{\lambda_2}} \tag{4-4}$$

Somit erhält man für den Restanteil $\delta\nabla\Delta Trop$, der idealerweise den Wert null haben sollte:

$$\delta\nabla\Delta Trop = \frac{\nabla\Delta\phi_1 - \frac{f_2}{f_1} \cdot \nabla\Delta\phi_2 - \frac{\nabla\Delta\rho_1 + \nabla\Delta Trop_{MODELL}}{\lambda_1} + \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{\nabla\Delta\rho_2 + \nabla\Delta Trop_{MODELL}}{\lambda_2} + \nabla\Delta N_1 - \frac{f_2}{f_1} \cdot \nabla\Delta N_2}{\frac{1}{\lambda_1} - \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{1}{\lambda_2}} \tag{4-5}$$

Nun werden die Mehrdeutigkeiten N_1 und N_2 um $\pm dN$ variiert und der jeweilige Restanteil mit seiner Standardabweichung $\sigma_{\delta\nabla\Delta Trop} = \sqrt{\frac{\sum_i \delta\nabla\Delta Trop_i}{Anzahl}}$ über alle i Epochen berechnet.

Die Lösungen mit den zwei geringsten Standardabweichungen werden nach dem Quotiententest nach BENNING [2002] bzw. WERNER [1999] getestet (auch „discrimination test“ genannt), d.h. das Verhältnis von zweitkleinster Standardabweichung σ_2 zu kleinster Standardabweichung σ_1 wird getestet:

$$F = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2} \geq F_{f_1, f_2; 1-\alpha} \tag{4-6}$$

wobei $F_{f_1, f_2; 1-\alpha}$ das Quantil der Fisherverteilung mit f_1 bzw. f_2 Freiheitsgraden sowie der Irrtumswahrscheinlichkeit α ist. Dabei muss beachtet werden, dass die Sicherheitswahrscheinlichkeit aufgrund der nicht gegebenen stochastischen Unabhängigkeit bewusst größer gewählt werden muss als durch $1-\alpha$ unmittelbar suggeriert wird. Ist die Testgröße F nun größer als das Quantil $F_{f_1, f_2; 1-\alpha}$, werden N_1 und N_2 auf die Werte mit der kleinsten Standardabweichung fixiert, ansonsten gilt die Lösung als nicht eindeutig von der zweitbesten unterscheidbar und kann damit nicht als zweifelsfrei korrekt identifiziert werden. Der Schwellwert liegt in der Praxis häufig im Bereich von 1,2-1,5, wenn längere Beobachtungszeiten vorliegen; bei der schnellen Fixierung – also wenigen Beobachtungen – kann der Wert deutlich größer sein.

Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 4-8 die Werte der Testgröße F über einen Zeitraum von 10 min für eine Basislinie von 19 km Länge aufgeführt: bei der oberen Zeitreihe wurden lediglich GPS L1/L2 Daten zur Positionierung herangezogen, bei der unteren Zeitreihe hingegen GPS L1/L5 und GALILEO E1/E5a Daten. Da es sich bei den hier verwendeten Daten um synthetische Daten handelt, die mit nur geringen atmosphärischen sowie Mehrwegefehlern behaftet sind, nimmt F vergleichsweise große Werte an. Jedoch ist deutlich der Unterschied einer Nutzung von nur GPS – F hat nach ca. 8 min einen Werte von ca. 300 – gegenüber einer kombinierten Nutzung von GPS und GALILEO – F hat nach ca. 8 min einen Werte von ca. 1100 – zu sehen, was auf die verbesserte Satellitengeometrie bzw. Satellitenanzahl zurückzuführen ist.

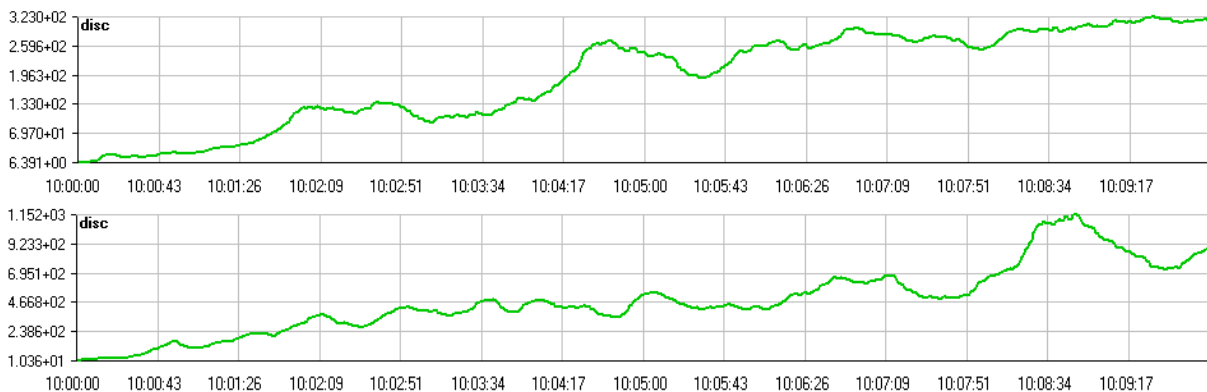


Abbildung 4-8: „Discrimination test“ für nur GPS L1/L2 (oben) bzw. GPS L1/L5 und GALILEO E1/E5a (unten) bei einer Positionierung über 10 min; man beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse

4.3.2.3 Kombination von „Wide-Lane“, Ionosphärenfreier Linearkombination und „Narrow Lane“ (WIF)

Bei dem WIF-Ansatz handelt es sich um eine klassische Methode, bei der zunächst eine Fixierung der „Wide Lane“ (Linearkombination mit besonders großer virtueller Wellenlänge) versucht wird. Anschließend wird der Fließkommawert für die ionosphärenfreie Linearkombination errechnet. Aus den beiden Ergebnissen kann dann unter Ausnutzung der Gerade-Ungerade-Bedingung die Fixierung der „Narrow Lane“ erfolgen; damit können wiederum die Werte für N_1 und N_2 berechnet werden.

Somit setzt sich der WIF-Ansatz aus folgenden Einzelschritten zusammen:

(1) Lösen der „Wide Lane“:

$$N_{WL} = N_1 - N_2 \quad (4-7)$$

Hier wird wie beim NIF-Ansatz der Median als Schätzer verwendet und ein entsprechender Überdeckungsbereich überprüft.

(2) Ionosphärenfreie Linearkombination:

$$N_c = N_1 - \frac{f_2}{f_1} \cdot N_2 \quad (4-8)$$

Der Median wird als float-Wert für N_c festgesetzt.

(3) Berechnung der „Narrow Lane“:

$$N_{NL} = N_1 + N_2 = \frac{f_1 \cdot (2 \cdot N_c - N_{WL}) - f_2 \cdot N_{WL}}{f_1 - f_2} \quad (4-9)$$

Nach SCHÜLER [2001] kann die Mehrdeutigkeit der „Narrow Lane“ N_{NL} aus denen der „Wide Lane“ N_{WL} und der ionosphärenfreien Linearkombination N_c berechnet werden; dabei muss berücksichtigt werden, dass N_{NL} und N_{WL} beide gerade oder ungerade sein müssen.

(4) Festsetzung der Mehrdeutigkeiten für N_1 und N_2 :

$$N_1 = \frac{1}{2} \cdot (N_{NL} + N_{WL}) \quad \text{und} \quad N_2 = \frac{1}{2} \cdot (N_{NL} - N_{WL}) \quad (4-10)$$

(5) Um eventuelle Fehlfixierungen auszuschließen, wird zusätzlich noch anschließend die TORA-Methode angewendet mit N_1 und N_2 als Startwerten. Findet die TORA-Suchmethode andere Werte für N_1 und N_2 , so werden diese nach erfolgreichem Diskriminierungstest akzeptiert.

(6) Ableitung von Genauigkeitsmaßen für N_1 und N_2 :

Mit

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{2} \cdot (N_{NL} + N_{WL}) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{f_1 \cdot (2 \cdot N_c - N_{WL}) - f_2 \cdot N_{WL}}{f_1 - f_2} + N_{WL} \right) = \frac{f_1}{f_1 - f_2} \cdot N_c - \frac{f_2}{f_1 - f_2} \cdot N_{WL} \\ N_2 &= \frac{1}{2} \cdot (N_{NL} - N_{WL}) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{f_1 \cdot (2 \cdot N_c - N_{WL}) - f_2 \cdot N_{WL}}{f_1 - f_2} - N_{WL} \right) = \frac{f_1}{f_1 - f_2} \cdot (N_c - N_{WL}) \end{aligned} \quad (4-11)$$

erhält man nach Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes

$$\sigma_{N_1}^2 = \frac{f_1^2}{(f_1 - f_2)^2} \cdot \sigma_{N_c}^2 + \frac{f_2^2}{(f_1 - f_2)^2} \cdot \sigma_{N_{WL}}^2 \quad \text{bzw.} \quad \sigma_{N_2}^2 = \frac{f_1^2}{(f_1 - f_2)^2} \cdot (\sigma_{N_c}^2 + \sigma_{N_{WL}}^2) \quad (4-12)$$

4.4 Berechnung von Flächenkorrekturparametern

4.4.1 Allgemeines

Der einfachste Ansatz ist, wie in Abbildung 4-2 dargestellt, eine ausgleichende Ebene (Wanninger [2000]):

$$L = a_0 + a_{\varphi\varphi} \cdot \Delta\varphi + a_{\lambda\lambda} \cdot \Delta\lambda \quad (4-13)$$

Bei doppelten Differenzen wird pauschal davon ausgegangen, dass a_0 nicht mehr vorhanden ist, d.h. es werden die relativen Korrekturgrößen relativ zur Masterstation ermittelt.

Die Flächenkorrekturparameter $a_{\varphi\varphi}$ und $a_{\lambda\lambda}$ (mit der Einheit $m/^\circ$) werden mittels einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadratsumme berechnet, d.h. mit

$$X = \begin{bmatrix} a_{\varphi\varphi} \\ a_{\lambda\lambda} \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} \nabla\Delta RES_{A,B} \\ \nabla\Delta RES_{A,C} \\ \vdots \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} \Delta\varphi_{A,B} & \Delta\lambda_{A,B} \\ \Delta\varphi_{A,C} & \Delta\lambda_{A,C} \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

erhält man

$$X = (A^T \cdot \Sigma_{LL}^{-1} \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot \Sigma_{LL}^{-1} \cdot L \quad \text{und} \quad \Sigma_{XX} = (A^T \cdot \Sigma_{LL}^{-1} \cdot A)^{-1}. \quad (4-15)$$

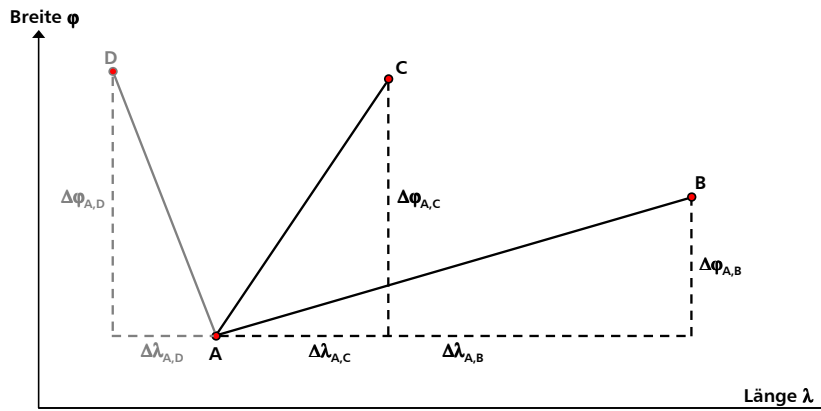


Abbildung 4-9: Stationsanordnung für Berechnung von Flächenkorrekturparametern

Um Flächenkorrekturparameter zu berechnen, benötigt man also mindestens drei Stationen A , B und C , die Basislinien gehen dabei alle von einer Zentralstation A aus, s. Abbildung 4-9. Es können aber auch weitere Stationen zur Berechnung hinzugenommen werden, so dass entweder eine Überbestimmung vorliegt oder aber ein zusätzlicher dritter Parameter mitgeschätzt werden kann – entweder für den troposphärischen Anteil ein Höhengradient a_{hh} oder für den ionosphärischen und troposphärischen Anteil ein bilinearer Parameter $a_{\varphi\lambda}$. Tests haben gezeigt, dass eine Modellierung mit mehr als drei Parametern unter gewöhnlichen Atmosphärenbedingungen zumeist keine signifikanten Verbesserungen erzielte, so dass darauf verzichtet wurde.

Es sei noch angemerkt, dass korrekterweise statt $\nabla\Delta RES_{A,B}$ $\nabla\Delta RES_{A,B}^{ij}$ geschrieben werden müsste, da die Flächenkorrekturparameter für jeden Satelliten individuell bestimmt werden. Der besseren Lesbarkeit halber wird aber im Folgenden weitestgehend auf den oberen Index ij verzichtet und – soweit sinnvoll – auch auf den unteren Index.

In den nachfolgenden Kapiteln (4.4.2 bzw. 4.4.3.1) wird das ionosphärische bzw. troposphärische Residuum $\nabla\Delta RES_{A,B}$, das für die Berechnung der Flächenkorrekturparameter benötigt wird (s. Formeln (4-14) und (4-15)), hergeleitet.

4.4.2 Ionosphäre

Das doppelt differenzierte ionosphärische Residuum ist für GPS $L1/L2$ bzw. allgemein

$$\nabla\Delta RES_{IONO} = 60 \cdot \nabla\Delta\varphi_1 - 77 \cdot \nabla\Delta\varphi_2 = a_2 \cdot \nabla\Delta\varphi_1 - a_1 \cdot \nabla\Delta\varphi_2. \quad (4-16)$$

Nachfolgend werden die Formeln allgemeingültig gehalten, also mit den Faktoren a_1 und a_2 für die beiden entsprechend verwendeten Signale, wie sie in Tabelle 4-5 aufgeführt sind.

Frequenzen	a_1	a_2
L1/L2	77	60
L1/L5	154	115
E1/E5a	154	115
E1/E5b	77	59
E1/E5ab	308	233
E1/E6	154	125

Tabelle 4-5: Linearfaktoren für das ionosphärische bzw. troposphärische Residuum

Aus (4-2) und (4-16)

$$\begin{aligned} \nabla\Delta\varphi_{a_2, a_1} &= a_2 \cdot \left(\frac{\nabla\Delta\rho}{\lambda_1} + \frac{\nabla\Delta Trop}{\lambda_1} - \frac{\nabla\Delta ION_{L1}}{\lambda_1} - \nabla\Delta N_1 \right) - a_1 \cdot \left(\frac{\nabla\Delta\rho}{\lambda_2} + \frac{\nabla\Delta Trop}{\lambda_2} - \frac{\nabla\Delta ION_{L1}}{\lambda_2} \cdot \frac{f_1^2}{f_2^2} - \nabla\Delta N_2 \right) \\ &= -a_2 \cdot \nabla\Delta N_1 + a_1 \cdot \nabla\Delta N_2 + \nabla\Delta ION_{L1} \cdot \left(-\frac{a_2}{\lambda_1} + \frac{a_1}{\lambda_2} \cdot \frac{f_1^2}{f_2^2} \right) \end{aligned} \quad (4-17)$$

lässt sich die doppelt differenzierte ionosphärische Laufzeitverzögerung $\nabla\Delta ION_{L1}$ (Einheit: m) auf der Frequenz f_1 (1575,42 MHz) berechnen:

$$\begin{aligned} \nabla\Delta ION_{L1}[m] &= \frac{a_2 \cdot \nabla\Delta\varphi_1 - a_1 \cdot \nabla\Delta\varphi_2 + a_2 \cdot \nabla\Delta N_1 - a_1 \cdot \nabla\Delta N_2}{-\frac{a_2}{\lambda_1} + \frac{a_1}{\lambda_2} \cdot \frac{f_1^2}{f_2^2}} \\ &= \frac{\frac{a_2}{a_1} \cdot \nabla\Delta\varphi_1 - \nabla\Delta\varphi_2 + \frac{a_2}{a_1} \cdot \nabla\Delta N_1 - \nabla\Delta N_2}{-\frac{\frac{a_2}{a_1}}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \frac{f_1^2}{f_2^2}} \quad \text{mit } \nabla\Delta\varphi_i \text{ in [cyc]} \end{aligned} \quad (4-18)$$

Die Varianz der doppelt differenzierten ionosphärischen Laufzeitverzögerung $\nabla\Delta ION_{L1}$ erhält man nach Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes

$$\sigma_{\nabla\Delta ION_{L1}}^2 = \left(\frac{\partial \nabla\Delta ION_{L1}}{\partial \varphi_1} \right)^2 \cdot \sigma_{\varphi_1}^2 + \left(\frac{\partial \nabla\Delta ION_{L1}}{\partial \varphi_2} \right)^2 \cdot \sigma_{\varphi_2}^2 \quad \text{mit } \sigma_{\varphi_i} \text{ in [cyc]}. \quad (4-19)$$

Somit erhält man mit $\sigma_{\Phi_1} = \sigma_{\varphi_1} \cdot \lambda_1$ und $\sigma_{\Phi_2} = \sigma_{\varphi_2} \cdot \lambda_2$ und $\sigma_{\Phi_1, \Phi_2} = 0$

$$\sigma_{\nabla\Delta ION_{L1}}^2 = \frac{\sigma_{\Phi_1}^2 + \sigma_{\Phi_2}^2}{\left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}\right)^2} \quad \text{oder} \quad \sigma_{\nabla\Delta ION_{L1}}^2 = \frac{2 \cdot \sigma_{\Phi}^2}{\left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}\right)^2} \quad \text{mit } \sigma_{\Phi_1} = \sigma_{\Phi_2} = \sigma_{\Phi}. \quad (4-20)$$

4.4.3 Troposphäre

4.4.3.1 Satelliten-spezifischer Ansatz

Das doppelt differenzierte troposphärische Residuum ist für GPS $L1/L2$ bzw. allgemein (s. Tabelle 4-5)

$$\nabla\Delta RES_{TROP} = 77 \cdot \nabla\Delta\varphi_1 - 60 \cdot \nabla\Delta\varphi_2 = a_1 \cdot \nabla\Delta\varphi_1 - a_2 \cdot \nabla\Delta\varphi_2. \quad (4-21)$$

Hieraus lässt sich wiederum aus (4-2) und (4-16) die doppelt differenzierte troposphärische Laufzeitverzögerung $\nabla\Delta Trop$ (Einheit: m) berechnen. Aus

$$\begin{aligned} \nabla\Delta\varphi_{a_1, a_2} &= a_1 \cdot \left(\frac{\nabla\Delta\rho}{\lambda_1} + \frac{\nabla\Delta Trop}{\lambda_1} - \frac{\nabla\Delta ION_{L1}}{\lambda_1} - \nabla\Delta N_1 \right) - a_2 \cdot \left(\frac{\nabla\Delta\rho}{\lambda_2} + \frac{\nabla\Delta Trop}{\lambda_2} - \frac{\nabla\Delta ION_{L1}}{\lambda_2} \cdot \frac{f_1^2}{f_2^2} - \nabla\Delta N_2 \right) \\ &= \nabla\Delta Trop \cdot \left(\frac{a_1}{\lambda_1} - \frac{a_2}{\lambda_2} \right) + \frac{a_1 \cdot \nabla\Delta\rho}{\lambda_1} - \frac{a_2 \cdot \nabla\Delta\rho}{\lambda_2} - a_1 \cdot \nabla\Delta N_1 + a_2 \cdot \nabla\Delta N_2 \end{aligned} \quad (4-22)$$

folgt

$$\begin{aligned} \nabla\Delta Trop [m] &= \frac{a_1 \cdot \nabla\Delta\varphi_1 - a_2 \cdot \nabla\Delta\varphi_2 - \frac{a_1 \cdot \nabla\Delta\rho}{\lambda_1} + \frac{a_2 \cdot \nabla\Delta\rho}{\lambda_2} + a_1 \cdot \nabla\Delta N_1 - a_2 \cdot \nabla\Delta N_2}{\frac{a_1}{\lambda_1} - \frac{a_2}{\lambda_2}} \quad \text{mit } \nabla\Delta\varphi_i \text{ in [cyc]} \\ &= \frac{\nabla\Delta\varphi_1 - \frac{a_2}{a_1} \nabla\Delta\varphi_2 - \frac{\nabla\Delta\rho}{\lambda_1} + \frac{a_2}{a_1} \cdot \frac{\nabla\Delta\rho}{\lambda_2} + \nabla\Delta N_1 - \frac{a_2}{a_1} \cdot \nabla\Delta N_2}{\frac{1}{\lambda_1} - \frac{a_2}{a_1 \lambda_2}} \end{aligned} \quad (4-23)$$

Für die Varianz von $\nabla\Delta Trop$

$$\sigma_{\nabla\Delta Trop}^2 = \left(\frac{\partial \nabla\Delta Trop}{\partial \varphi_1} \right)^2 \cdot \sigma_{\varphi_1}^2 + \left(\frac{\partial \nabla\Delta Trop}{\partial \varphi_2} \right)^2 \cdot \sigma_{\varphi_2}^2 \quad \text{mit } \sigma_{\varphi_i} \text{ in [cyc]} \quad (4-24)$$

erhält man mit $\sigma_{\Phi_1} = \sigma_{\varphi_1} \cdot \lambda_1$ und $\sigma_{\Phi_2} = \sigma_{\varphi_2} \cdot \lambda_2$ und $\sigma_{\Phi_1\Phi_2} = 0$

$$\sigma_{\nabla\Delta Trop}^2 = \frac{\sigma_{\Phi_1}^2}{\left(1 - \frac{f_2^2}{f_1^2}\right)^2} + \frac{\sigma_{\Phi_2}^2}{\left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}\right)^2} \quad \text{oder} \quad \sigma_{\nabla\Delta Trop}^2 = \sigma_{\Phi}^2 \cdot \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{f_2^2}{f_1^2}\right)^2} + \frac{1}{\left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}\right)^2} \right) \quad \text{mit } \sigma_{\Phi_1} = \sigma_{\Phi_2} = \sigma_{\Phi}. \quad (4-25)$$

Die Modellierung wird ebenso wie bei der Ionosphäre für jede doppelte Differenz, also jede Satellitenkombination (satelliten-spezifischer Korrekturansatz), durchgeführt. Dies hat den Vorteil, dass mögliche azimutale Asymmetrien, wie z.B. beim Durchzug einer Schlechtwetterfront, mit diesem Ansatz gut aufgefangen werden können.

Für die Bestimmung der ionosphärischen Flächenkorrekturparameter ist es aus rein theoretischer Sicht nicht zwingend erforderlich, zuvor ein à priori Modellwert zu subtrahieren (was jedoch trotzdem immer getan wird). Im Gegensatz dazu ist dies aber aufgrund der starken Höhenabhängigkeit für die troposphärische Laufzeitverzögerung zu meist ausgesprochen sinnvoll, in einem Netz mit größeren Höhenunterschieden sogar zwingend erforderlich.

4.4.3.2 Stations-spezifische Modellierung

Die stations-spezifische Modellierung wird auf Ebene der *absoluten* troposphärischen Laufzeitverzögerung (ZPD) mit Hilfe von doppelten Differenzen durchgeführt. Dies führt, wie SCHÜLER [2001] gezeigt hat, bei vergleichsweise kurzen Basislinien zu einem schleppenden Konvergenzverhalten gegen den wahren Wert (je nach Basislinienlänge wird 99% des wahren Wertes erst nach ein oder mehreren Stunden erreicht). Dieser Ansatz kann also von der Genauigkeit her nur Vorteile bringen, wenn entweder ausreichend lange Beobachtungszeiten vorhanden sind (und über diese Zeit ein geglätteter Wert die Realität beschreiben kann, d.h. die Wetterlage sich in dieser Zeit nicht ändert) oder aber in größeren Netzwerken. Somit ist dieser Ansatz grundsätzlich gewissen Einschränkungen bzw. Rahmenbedingungen unterworfen.

Im Folgenden wird der stations-spezifische Ansatz zur Modellierung der troposphärischen Laufzeitverzögerung beschrieben. Es erfolgt bei NEREUS zunächst für alle Stationen eine Mittelbildung des ZPD-Modellwertes und seiner Standardabweichung über eine Minute, woraus letztlich mittlere troposphärische Korrekturparameter berechnet werden.

Das doppelt differenzierte troposphärische Residuum lässt sich als

$$\nabla\Delta\text{Trop}_{AB}^{ij} = (m_B^j \cdot \text{ZPD}_B^j - m_A^j \cdot \text{ZPD}_A^j) - (m_B^i \cdot \text{ZPD}_B^i - m_A^i \cdot \text{ZPD}_A^i) \quad (4-26)$$

darstellen. Der wahre Wert für den ZPD setzt sich zusammen aus einem Modellwert (aus TropGrid, numerischen Wettermodellen oder aus GPS abgeleiteten Werten) und einer Verbesserung:

$$\begin{aligned} \text{ZPD}_A^j &= \text{ZPD}_A + \delta\text{ZPD}_A^j \\ \text{ZPD}_B^j &= \text{ZPD}_B + \delta\text{ZPD}_B^j \end{aligned} \quad (4-27)$$

...

Daraus ergibt sich für das doppelt differenzierte troposphärische Residuum:

$$\begin{aligned} \nabla\Delta\text{Trop}_{AB}^{ij} &= \underbrace{(m_B^j \cdot \text{ZPD}_B - m_A^j \cdot \text{ZPD}_A) - (m_B^i \cdot \text{ZPD}_B - m_A^i \cdot \text{ZPD}_A)}_{\nabla\Delta\text{Trop}_{AB\text{MODELL}}^{ij}} + \\ &+ (m_B^j \cdot \delta\text{ZPD}_B^j - m_A^j \cdot \delta\text{ZPD}_A^j) - (m_B^i \cdot \delta\text{ZPD}_B^i - m_A^i \cdot \delta\text{ZPD}_A^i) \end{aligned} \quad (4-28)$$

Es wird angenommen, dass $\delta\text{ZPD}_A^j \approx \delta\text{ZPD}_A^i$ (analog für alle anderen Stationen), daraus folgt:

$$\nabla\Delta\text{Trop}_{AB}^{ij} - \nabla\Delta\text{Trop}_{AB\text{MODELL}}^{ij} = (m_B^j - m_A^j) \cdot \delta\text{ZPD}_B - (m_A^j - m_A^i) \cdot \delta\text{ZPD}_A \quad (4-29)$$

Die Korrekturwerte $X = (\delta\text{ZPD}_A \quad \delta\text{ZPD}_B \quad \delta\text{ZPD}_C)^T$ werden durch eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadratsumme berechnet; dabei werden folgende Matrizen verwendet (hier unter Verwendung von drei Stationen):

Um den stations-spezifischen Korrekturansatz (nur Troposphäre) für eine beliebige doppelte Differenz $\nabla\Delta\text{Trop}_{RM}^j$ zu verwenden, müssen zunächst die troposphärischen Laufzeitverzögerungen für die Stationen R und M berechnet werden:

$$\begin{aligned} ZPD_R^* &= ZPD_A^* + a_{\varphi\varphi} \cdot (\varphi_R - \varphi_A) + a_{\lambda\lambda} \cdot (\lambda_R - \lambda_A) \\ ZPD_M^* &\text{ analog} \end{aligned} \quad (4-35)$$

Diese werden dann auf die Roverhöhe bzw. die ursprüngliche Referenzstationshöhe reduziert und die doppelte Differenz wird gebildet:

$$\begin{aligned} \nabla\Delta\text{Trop}_{RM}^j &= (\text{Trop}_M^j - \text{Trop}_R^j) - (\text{Trop}_M^i - \text{Trop}_R^i) \\ &= (m_M^j - m_M^i) \cdot ZPD_M^* - (m_R^j - m_R^i) \cdot ZPD_R^* \end{aligned} \quad (4-36)$$

Die Genauigkeitsmaße für $\sigma_{a_{\varphi\varphi}}$, $\sigma_{a_{\lambda\lambda}}$ und $\sigma_{a_{\varphi\varphi}a_{\lambda\lambda}}$ erhält man aus der Kovarianzmatrix bei der Ausgleichung. Dementsprechend erhält man für die Varianz der doppelt differenzierten ionosphärischen bzw. troposphärischen (satelliten-spezifischer Korrekturansatz) Laufzeitverzögerung unter Zuhilfenahme von Flächenkorrekturparametern:

$$\begin{aligned} \sigma_{\nabla\Delta\text{ION}_{L1RM}^j}^2 &= \left(\frac{\partial\text{korr}^j}{\partial a_{\varphi\varphi}^j}\right)^2 \cdot \sigma_{a_{\varphi\varphi}^j}^2 + \left(\frac{\partial\text{korr}^j}{\partial a_{\lambda\lambda}^j}\right)^2 \cdot \sigma_{a_{\lambda\lambda}^j}^2 + \left(\frac{\partial\text{korr}^i}{\partial a_{\varphi\varphi}^i}\right)^2 \cdot \sigma_{a_{\varphi\varphi}^i}^2 + \left(\frac{\partial\text{korr}^i}{\partial a_{\lambda\lambda}^i}\right)^2 \cdot \sigma_{a_{\lambda\lambda}^i}^2 + \\ &+ 2 \cdot \left(\frac{\partial\text{korr}^j}{\partial a_{\varphi\varphi}^j}\right) \cdot \left(\frac{\partial\text{korr}^j}{\partial a_{\lambda\lambda}^j}\right) \cdot \sigma_{a_{\varphi\varphi}^j a_{\lambda\lambda}^j} + 2 \cdot \left(\frac{\partial\text{korr}^i}{\partial a_{\varphi\varphi}^i}\right) \cdot \left(\frac{\partial\text{korr}^i}{\partial a_{\lambda\lambda}^i}\right) \cdot \sigma_{a_{\varphi\varphi}^i a_{\lambda\lambda}^i} \\ &= \Delta\varphi_{RM}^2 \cdot \left(\sigma_{a_{\varphi\varphi}^j}^2 + \sigma_{a_{\varphi\varphi}^i}^2\right) + \Delta\lambda_{RM}^2 \cdot \left(\sigma_{a_{\lambda\lambda}^j}^2 + \sigma_{a_{\lambda\lambda}^i}^2\right) + 2 \cdot \Delta\varphi_{RM} \cdot \Delta\lambda_{RM} \cdot \left(\sigma_{a_{\varphi\varphi}^j a_{\lambda\lambda}^j} + \sigma_{a_{\varphi\varphi}^i a_{\lambda\lambda}^i}\right) \\ \sigma_{\nabla\Delta\text{Trop}_{RM}^j}^2 &\text{ analog} \end{aligned} \quad (4-37)$$

Werden neben den Parametern $a_{\varphi\varphi}$ und $a_{\lambda\lambda}$ noch ein bilinearer Parameter $a_{\varphi\lambda}$ oder ein Höhengradient a_{hh} bzw. beim stations-spezifischen Korrekturansatz ein absoluter Term a_{00} verwendet, so wird Formel (4-37) entsprechend erweitert.

4.6 Genauigkeitsanalyse der Flächenkorrekturparameter

Für eine Genauigkeitsanalyse der verschiedenen Modellierungsansätze für Flächenkorrekturparameter standen SAPOS®-Daten für zwei verschiedene Teilnetze zu unterschiedlichen Zeitpunkten zur Verfügung. Das Stationsnetz in Bayern weist die in Deutschland größten Stationsabstände auf, in Thüringen hingegen haben die Stationen einen vergleichsweise geringen Abstand zueinander.

Es wurden alle in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Korrekturansätze getestet. Bei diesen Untersuchungen wurde festgestellt, dass unter normalen Wetterverhältnissen eine planare Approximation ausreichend ist und durch Hinzunahme des bilinearen Terms keine Genauigkeitssteigerung erzielt werden kann. Eine Mitschätzung des Höhengradienten kann bei der Troposphäre sinnvoll sein, setzt aber ein passendes Netzwerk von Referenzstationen voraus, d.h. es müssen Höhenvariationen mit ausreichender Amplitude für eine sichere Schätzung dieses Parameters vorhanden sein. Des Weiteren wurden verschiedene Elevationsmasken verwendet (10° und 15°).

Bei den Untersuchungen wurde folgendermaßen vorgegangen: Die Flächenkorrekturparameter wurden über die Referenzstationen (kürzeste Basislinien) abgeleitet. Danach erfolgte die Auswertung aller Basislinien von einem Rover (hier eine weitere SAPOS[®]-Station) zu den zuvor benutzten Referenzstationen, d.h. es wurden die Differenzen zwischen dem doppelt differenzierten ionosphärischen/troposphärischen Residuum und dem doppelt differenzierten ionosphärischen/troposphärischen Modellwert plus interpoliertem Flächenkorrekturparameter-Wert gebildet, die idealerweise null sein müssten.

In den folgenden beiden Unterkapiteln wird eine ausgewählte Übersicht über die Ergebnisse gegeben. Detailliertere Ergebnisse sind in Anhang C aufgeführt.

4.6.1 Netz Bayern

In Abbildung 4-10 sind alle bayerischen SAPOS[®]-Stationen dargestellt, für die RINEX-Daten zur Verfügung gestellt wurden, und zwar für den 18. Mai 2006 (Tag des Jahres 138) und den 24. Mai 2006 (Tag des Jahres 144) jeweils von 10 - 22 h UT.

Es wurden bewusst Stationen aus zwei Teilnetzen gewählt, da diese sich von der Topographie her wesentlich unterscheiden: im nördlichen Teilnetz eher geringe Höhenunterschiede, im südlichen Teilnetz dagegen vor allem mit der Station Garmisch (genauer Wank-Gipfel) größere Höhenunterschiede. In Abbildung 4-11 sind die verwendeten Stationen mit ihrer Höhe und Basislinienlängen skizziert.



Abbildung 4-10: Übersicht über die bayerischen SAPOS[®]-Referenzstationen

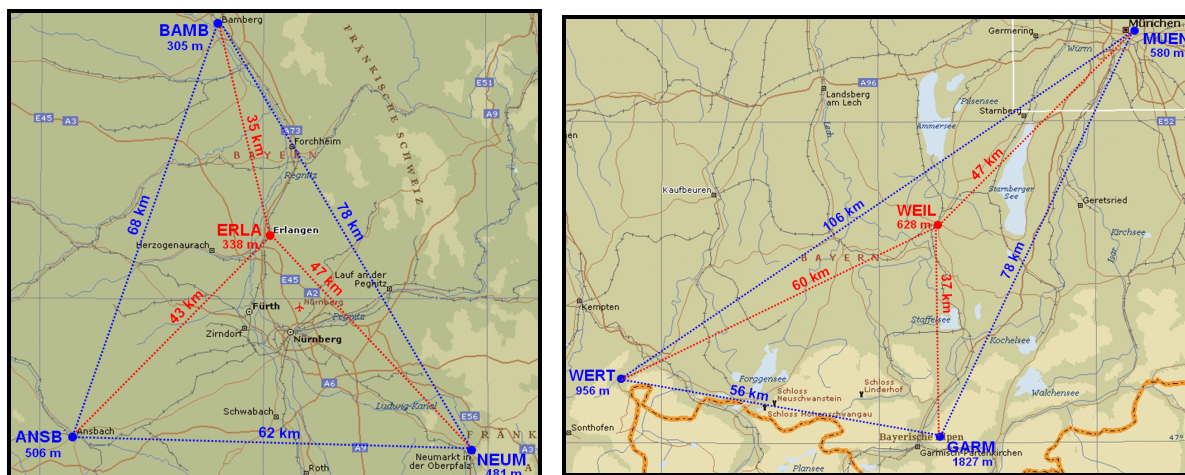


Abbildung 4-11: Nördliches und südliches Teilnetz; blaue Stationen werden als Referenzstationen genutzt, die rote als "Rover"; Höhen sind ellipsoidische Höhen

In Abbildung 4-12 sind die Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse dargestellt. Hierbei wurden eine Elevationsmaske von 10° , als à priori Ionosphärenmodell das Klobuchar-Modell und als à priori Troposphärenmodell numerische Wettermodelle (NWM) gewählt. Bei den Werten handelt es sich um den Durchschnitt der Standardabweichung der Einzelwerte der Differenzen zwischen dem doppelt differenzierten ionosphärischen bzw. troposphärischen Residuum und dem doppelt differenzierten Modellwert plus entsprechendem atmosphärischem Korrekturwert über alle Basislinien. Zusätzlich wurden die Werte für die Ionosphäre über 120 s, für die Troposphäre über 300 s geglättet.

Es wurde eine Analyse sowohl für das nördliche als auch das südliche Teilnetz durchgeführt. Aus Gründen einer zeit-effizienteren Datenverarbeitung wurden jeweils zwei-stündige Intervalle prozessiert.

Für die Ionosphäre wurde der klassische Ansatz mit zwei Flächenkorrekturparametern verwendet sowie zusätzlich ein bilinearer Koeffizient mitgeschätzt, wobei hierfür eine vierte Station (Station AUER – Auerbach – für das nördlich Teilnetz und MIND – Mindelheim – für das südliche Teilnetz) für die Ableitung der Parameter notwendig war. Es zeigte sich hierbei kein signifikanter Unterschied in der Genauigkeit zwischen dem klassischen Ansatz mit zwei Parametern und dem Ansatz mit drei Parametern (plus bilinear).

Für die Troposphäre wurden vier unterschiedliche Korrekturansätze getestet: (a) klassisch mit zwei Parametern, (b) zusätzlich ein Höhengradient, (c) zusätzlich ein bilinearer Parameter und (d) der stations-spezifische Ansatz. Allen Ergebnissen gemeinsam ist, dass der klassische Ansatz (a) immer zu den Ansätzen mit der höchsten Genauigkeit zählt, der Ansatz (b) hingegen immer die schlechteste Genauigkeit aufwies – auch im südlichen Teilnetz, in dem größere Höhenunterschiede auftreten. Der bilineare Ansatz (c) weist wie bei der ionosphärischen Modellierung keinen signifikanten Unterschied zum klassischen Ansatz (a) auf. Der stations-spezifische Ansatz (d) erzielt im nördlichen Teilnetz Genauigkeiten auf demselben Niveau wie der klassische Ansatz (a), im südlichen Teilnetz sogar durchweg höhere Genauigkeiten.

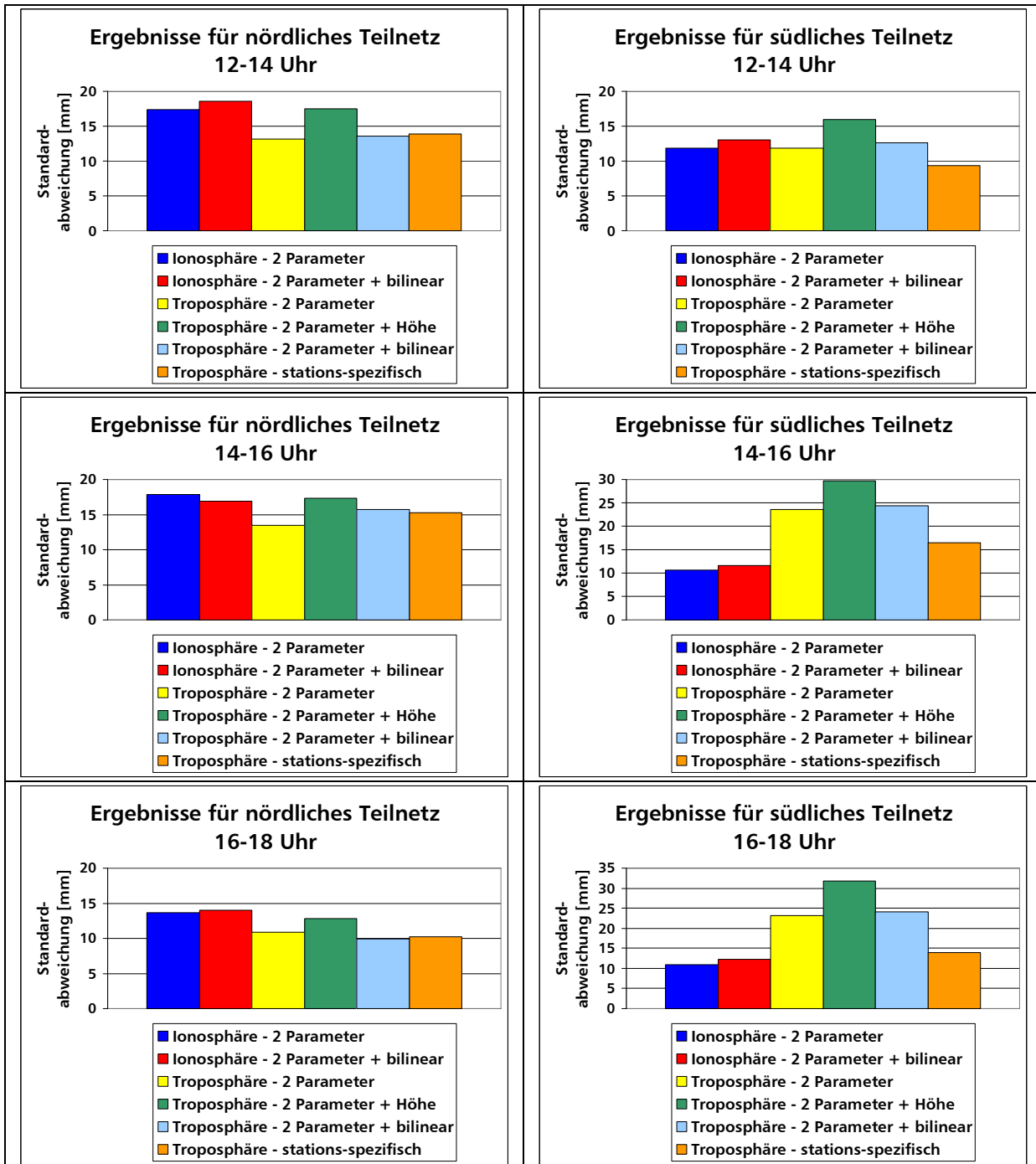


Abbildung 4-12: Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse für Bayern (links: nördliches Teilnetz, rechts: südliches Teilnetz) für Tag 138 des Jahres 2006; Differenzen wurden für die Ionosphäre über 120 s, für die Troposphäre über 300 s geglättet

4.6.2 Netz Thüringen

Für alle thüringischen SAPOS[®]-Stationen wurden RINEX-Stationen für den gesamten Zeitraum 11.-13. September 2005 zur Verfügung gestellt. Da es auf thüringischer Seite zu dieser Zeit z.T. Datenausfälle gab, wurden zusätzlich Daten für die hessische Station Bad Hersfeld (BAHE) bereitgestellt. Die anderen, ebenfalls in Abbildung 4-13 dargestellten, nicht-thüringischen Stationen ESCH (Eschwege), SANG (Sangerhausen) und WEIS (Weißenfels) werden nur für Simulationszwecke verwendet (s. Kapitel 7).

Die Untersuchungen erfolgten in drei Teilnetzen mit jeweils drei Referenzstationen plus einer Rover-Station. Die Teilnetze zeichnen sich durch einen geringen, mittleren bzw. großen Stationsabstand aus, s. Abbildung 4-14.

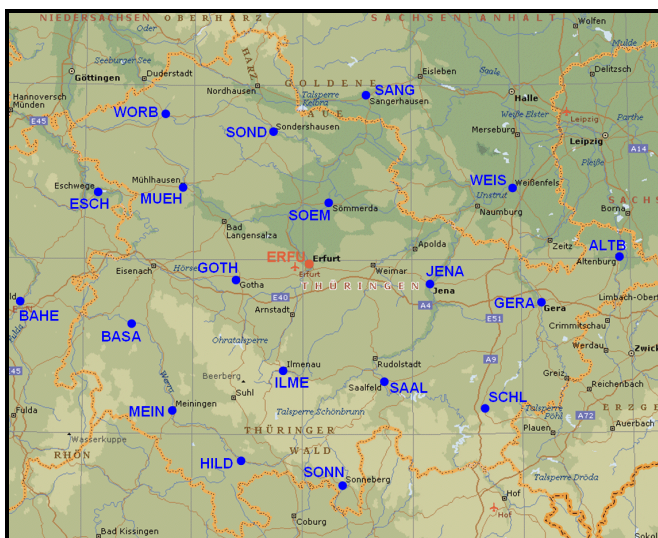
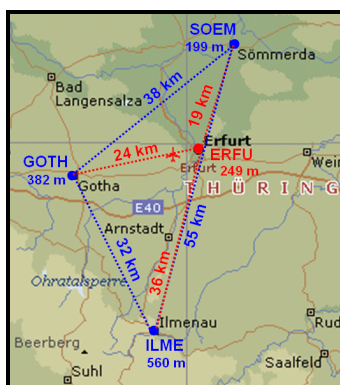


Abbildung 4-13: Übersicht über die thüringischen SAPOS®-Referenzstationen

Netz 1:
durchschnittliche
Basislinienlänge
27 km



Netz 2:
durchschnittliche
Basislinienlänge
50 km



Netz 3:
durchschnittliche
Basislinienlänge
67 km

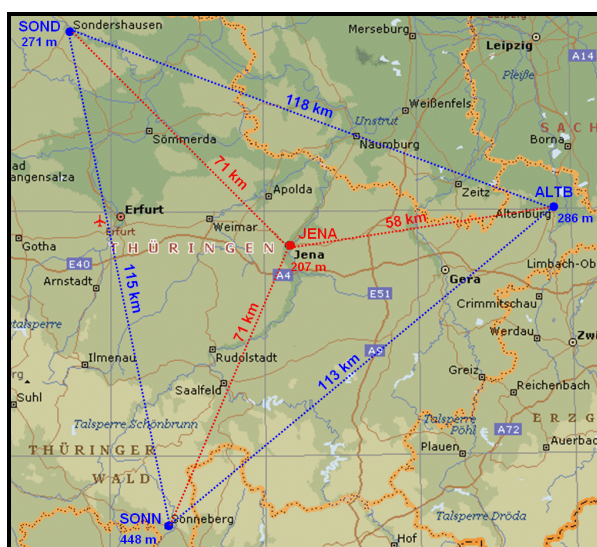


Abbildung 4-14: Drei Teilnetze für die Untersuchung von Flächenkorrekturparametern; Referenzstationen in blau, „Rover“-Station in rot; ellipsoidische Höhen

Aus dem dreitägigen Zeitraum, für den Daten zur Verfügung standen, wurden insgesamt fünf Zwei-Stunden-Intervalle für die Genauigkeitsanalyse ausgewählt. Diese Intervalle unterscheiden sich vor allem in der Intensität der Ionosphärenaktivität (s. auch Kapitel 5.4.2), was sich auch in den doppelt differenzierten ionosphärischen Residuen widerspiegelt, die in Abbildung C-1 bis Abbildung C-3 in Anhang C dargestellt sind. An dieser Stelle seien nur die Ergebnisse dreier Zeiträume (Tag 254 des Jahres 2006, 13-15 h bzw. 17-19 h und Tag 255 des Jahres 2006, 17-19 h) dargestellt, alle Ergebnisse sind in Tabelle C-5 bis Tabelle C-10 in Anhang C zu finden.

Da die Auswertungen im bayerischen Netz ergeben haben, dass eine Modellierung mit drei Parametern keine Verbesserungen ergeben, werden hier nur die Ergebnisse mit zwei Parametern aufgeführt.

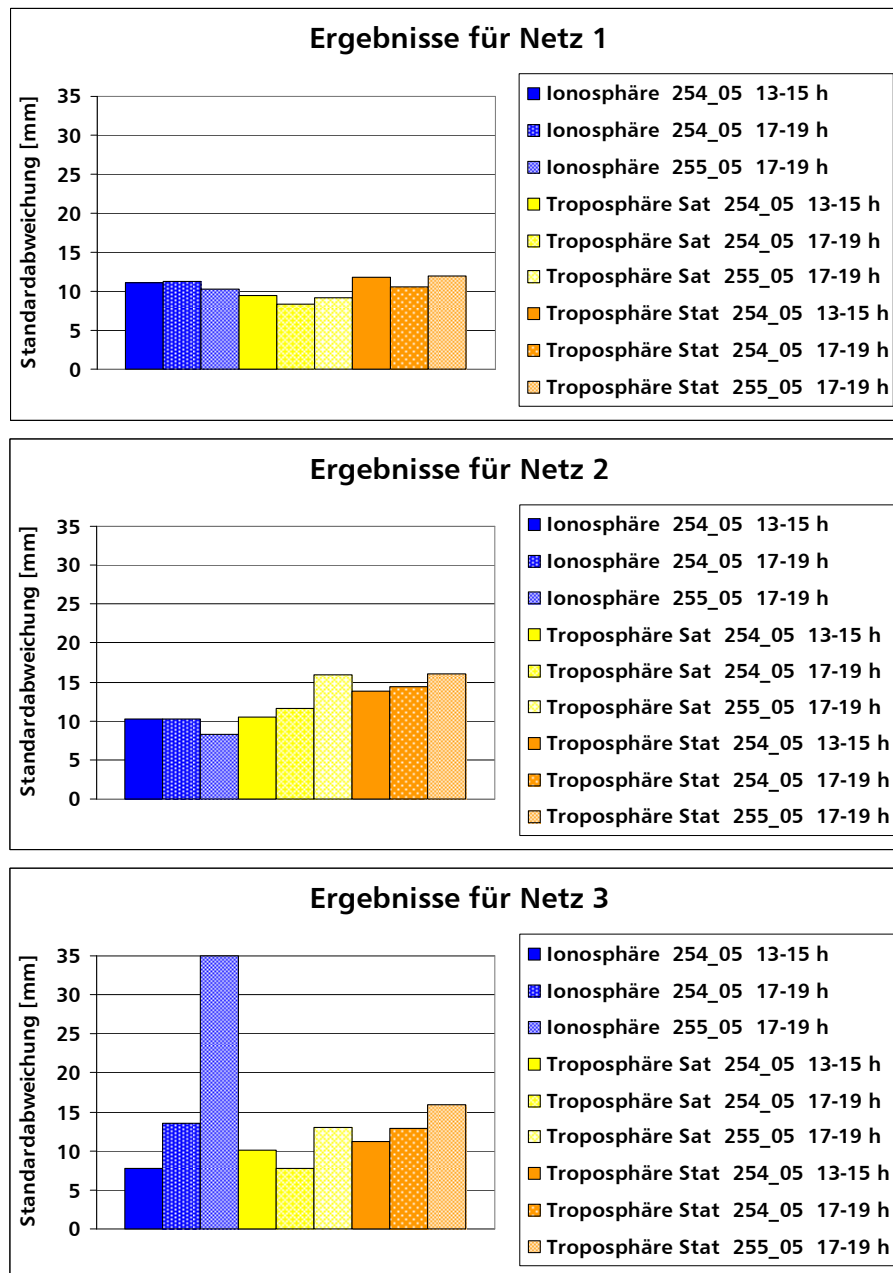


Abbildung 4-15: Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse für Thüringen für die Tage 254 bzw. 255 des Jahres 2005; Differenzen wurden für die Ionosphäre über 120 s, für die Troposphäre über 300 s geglättet

Bei den Analyseergebnissen, die in Abbildung 4-15 dargestellt sind, wurden eine Elevationsmaske von 15° , als à priori Ionosphärenmodell ebenfalls das Klobuchar-Modell und als à priori Troposphärenmodell numerische Wettermodelle (NWM) gewählt. Auch hier handelt es sich bei den Werten um den Mittelwert der Standardabweichung der Differenzen zwischen dem doppelt differenzierten ionosphärischen bzw. troposphärischen Residuum und dem doppelt differenzierten Modellwert plus entsprechendem atmosphärischem Korrekturwert über alle Basislinien; zusätzlich wurden die Werte für die Ionosphäre über 120 s, für die Troposphäre über 300 s geglättet.

Wie schon erwähnt, wurde für die Ionosphäre lediglich der klassische Ansatz mit zwei Flächenkorrekturparametern verwendet. Für die Troposphäre wurde zum einen der klassische satelliten-spezifische Korrekturansatz mit zwei Parametern und zum anderen der stations-spezifische Ansatz getestet. Beim Vergleich der Ergebnisse für die drei Teilnetze fällt vor allem die vergleichsweise schlechte Genauigkeit der ionosphärischen Korrekturparameter im Netz 3 am ionosphärisch aktiveren Tag 255 auf. Eine eventuelle Fehlfixierung der Mehrdeutigkeiten ist jedoch eher unwahrscheinlich, da die entsprechenden troposphärischen Korrekturparameter keine signifikant größere Standardabweichungen aufweisen. Des Weiteren fällt bei näherer Betrachtung der Ergebnisse (Netz 3, Tag 255) auf, dass nur bei einer Satellitenkombination (Master- und Childsatellit) die Genauigkeit der ionosphärischen Korrekturparameter deutlich schlechter ist. Klammert man die Ergebnisse dieser Satellitenkombination aus, so liegt die Genauigkeit der ionosphärischen Korrekturparameter auf dem gleichen Niveau wie alle anderen Ergebnisse. Somit ist keine eindeutige Abhängigkeit der Genauigkeit von der Basislinienlänge und der Stärke der Ionosphärenaktivität zu erkennen, wobei einschränkend zu sagen ist, dass auch am Tag 255 im Vergleich zu Zeiten maximaler Ionosphärenaktivität moderate Ionosphärenverhältnisse vorherrschten.

Es sei schon an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass bei der Verwendung von simulierten Daten (Kapitel 7) die Ableitung der Flächenkorrekturparameter mit korrekt fixierten Mehrdeutigkeiten erfolgt, da diese bei einer Generierung synthetischer Beobachtungsdaten bekannt sind.

Bezüglich der Ergebnisse für die troposphärischen Korrekturparameter lässt sich eine leicht schlechtere Performance des stations-spezifischen Ansatzes gegenüber dem satelliten-spezifischen Ansatz erkennen.

5 Schnelle GNSS Positionierung

Im Hinblick auf die präzise Positionsbestimmung kommt das Modul „SEMIKA“ der PrePos GNSS Suite zum Einsatz. Diese Software kann sowohl zur schnellen statischen/semi-kinematischen als auch zur voll-kinematischen Positionierung verwendet werden. Die ursprüngliche Zielsetzung bei der Entwicklung dieser Software war die präzise kinematische Positionierung über große Entfernungen mit von einigen hundert bis zu mehr als tausend Kilometer langen Basislinien. Dieses Prinzip kam z.B. während der ENVISAT Radaraltimeter-Kalibrierung (s. SCHÜLER [2005]) oder auch zur Bestimmung des Wasserdampfgehaltes der Atmosphäre auf Schiffen in der Ostsee (s. SCHÜLER [2006a]) zum Einsatz.

Die nachfolgenden Unterkapitel geben einen Überblick über die GNSS Positionierung mit SEMIKA, wobei jedoch die für diese Arbeit notwendigen Modifikationen in den Vordergrund gestellt werden. Die Notwendigkeit zur Ergänzung und Modifikation betrifft insbesondere die Algorithmen zur Mehrdeutigkeitslösung, da SEMIKA in der ursprünglichen Fassung auf die Verarbeitung besonders langer Basislinien ausgelegt war und aus diesem Grund eine lange Konvergenzzeit für die Mehrdeutigkeitslösung zugestanden wurde. Für eine RTK-Positionierung steht jedoch eine schnelle Mehrdeutigkeitslösung im Vordergrund.

Außerdem erfolgte eine Erweiterung auf die Verarbeitung von Drei-, Vier- und Fünf-Frequenzdaten für GPS und das in dieser Software bisher nicht eingebundene GALILEO-System, wobei in letzterem Fall verschiedene Auswahl- und Kombinationsmöglichkeiten gegeben sind.

Analog zu Kapitel 4 werden abschließend Ergebnisse unter Nutzung realer Zweifrequenz-GPS-Daten dargestellt.

5.1 Datenverarbeitungsschritte

Die einzelnen Verarbeitungsschritte zur Positionierung wurden in SCHÜLER [2006b] insbesondere in Kapitel 2 detailliert dargestellt. Nachfolgend wird ein zusammenfassender Überblick über die wesentlichen Schritte gegeben sowie grundsätzliche Ergänzungen und Modifikationen angesprochen, die zur Erfüllung der in dieser Arbeit gestellten Aufgaben notwendig sind.

5.1.1 Übersicht

- Die einzelnen von SEMIKA durchgeführten Prozessierungsschritte bestehen aus
- (1) der Ermittlung einer DGPS-Einzelepochenlösung, dabei werden nur Pseudostrecken-Beobachtungen verwendet. Bei voll-kinematischen Beobachtungsdaten wird zuvor noch zunächst eine Einzelstationslösung durchgeführt. In diesem Prozessierungsschritt werden weiterhin praktisch alle notwendigen Schritte zur Datenaufbereitung durchgeführt, dazu zählt auch die Interpolation der Satellitenorbits zum Abstrahlzeitpunkt.
 - (2) Daran schließt sich eine zeitlich relative PDGPS-Einzelepochenlösung an, d.h. es werden dreifache Differenzen – doppelte Differenzen zweier aufeinander folgender Epochen – verwendet, um die Koordinatenänderung präzise abzuleiten. Der eigentliche Sinn dieses Zwischenschrittes besteht im Wesentlichen jedoch darin, an dieser Stelle noch einmal zu überprüfen, ob in den Trägerphasenmessungen ggf. noch Phasensprünge (cycle slips) bislang übersehen worden sind.
 - (3) Nun folgt in der klassischen Variante von SEMIKA die sog. „PDGPS-

Blockausgleichung“, hierfür werden im Allgemeinen nur Trägerphasenmessungen verwendet. Während dieses Ausgleichungsprozesses werden Fließkommawerte für die Mehrdeutigkeiten bestimmt sowie Positionen und ggf. troposphärische Laufzeitverzögerungen mitgeschätzt. Anschließend erfolgt dann der Versuch, die Fließkomma-Mehrdeutigkeiten mit einem geeigneten Verfahren auf ihre ganzzahligen Werte festzusetzen.

- (4) Im letzten Schritt wird mit Hilfe der erfolgreich fixierten Mehrdeutigkeiten nun die präzise Positionsbestimmung für alle Einzelepochen vollzogen.

Zu erwähnen ist noch, dass SEMIKA die Positionierung eines kinematischen „Rovers“ innerhalb eines Netzes von Referenzstationen erlaubt, d.h. es kann mehr als nur eine Referenzstation verarbeitet werden. Die Software ist zwar auf Post-Processing ausgelegt, jedoch sind die zum Einsatz kommenden Methoden – insbesondere die vorgenommenen Modifikationen – vom Grundsatz her ebenfalls in einer Echtzeitumgebung einsetzbar.

Abgesehen von Schritt (2), in dem dreifache Differenzen verwendet werden, nutzt SEMIKA grundsätzliche doppelt differenzierte Beobachtungsgrößen.

5.1.2 Datenaufbereitung

Unter der Datenaufbereitung werden alle Schritte nach dem Einlesen der Daten bis hin zur Bereitstellung der zur Positionierung benötigten doppelt differenzierten Beobachtungsgrößen verstanden. Dies umfasst im Wesentlichen das Anbringen von Korrekturen und Reduktionen. In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass die Korrektur- und Reduktionsmodelle von SEMIKA denen von NEREUS gleichen, d.h. es ist diesbezüglich nicht mit Inkonsistenzen bei der Datenanalyse zu rechnen. Viel mehr basiert NEREUS – als Modul zur Ermittlung von atmosphärischen Korrekturen aus GNSS Daten – auf der Grundplattform von SEMIKA. Beide Module – Netzwerkanalyse und Roverpositionierung – sind bezüglich der Datenaufbereitung somit gewissermaßen „aus einem Guss“ gefertigt. Dementsprechend kann für die Beschreibung der anzubringenden Korrekturen und Reduktionen vollständig auf Kapitel 4.3.1 verwiesen werden.

5.1.3 Ergänzungen und Modifikationen

Aufgrund der o.a. ursprünglichen Zielsetzung bei der Entwicklung des Moduls SEMIKA sind mehrere verschiedene Ergänzungen bzw. Modifikationen erforderlich geworden. Diese beziehen sich im Wesentlichen auf die Verarbeitung von atmosphärischen Korrekturen sowie auf die Algorithmen zur Mehrdeutigkeitslösung.

In der ursprünglichen Fassung der Software werden zwar verschiedene Korrekturansätze bzgl. der Ionosphäre und Troposphäre unterstützt, die jedoch maßgeblich auf externe Quellen angewiesen waren. So werden beispielsweise numerische Wettermodelle unterstützt, die eine vergleichsweise präzise Bestimmung der troposphärischen Laufzeitverzögerung erlauben. Die fehlende Verarbeitung atmosphärischer Korrekturen unter Nutzung der über NEREUS abgeleiteten Flächenkorrekturparametern wurde ergänzt; die genaue Interpolation dieser Parameter und die Bestimmung des Fehlerbudgets ist in Kapitel 4.5 beschrieben.

Für die Mehrdeutigkeitsfixierung wurde in der ursprünglichen Fassung von SEMIKA immer eine dedizierte Linearkombination aus GPS Zweifrequenzdaten verwendet. Zumeist handelte es sich dabei um eine näherungsweise ionosphärenfreie Linearkombination, da über lange Basislinien positioniert wurde. Eine Fixierung der Original-

Mehrdeutigkeiten $N1$ und $N2$ erfolgte jedoch nicht. Genau dieses ist jedoch für eine Anwendung in aktiven Referenznetzwerken wie z.B. *SAPOS*[®] sehr sinnvoll, da man damit für die eigentliche Positionierung – also nach der Mehrdeutigkeitsfixierung – sehr flexibel jede beliebige Linearkombination wählen kann. So kann man beispielsweise über längere Entfernungen dann die (nicht mehr ganzzahlige) ionosphärenfreie Linearkombination wählen und damit die unvermeidbaren Restfehler der ionosphärischen Flächenkorrekturparameter eliminieren; es verbleibt dann im Wesentlichen nur noch der troposphärische Restfehler, der bei Bedarf noch durch Mitschätzung der residuellen troposphärischen Laufzeitverzögerung reduziert werden kann.

Des Weiteren war die bisherige Methodik der Mehrdeutigkeitslösung nur sehr eingeschränkt auf eine schnelle Fixierung ausgelegt. Aufgrund der höheren atmosphärischen Restfehler – keine Verwendung von Flächenkorrekturparametern – über die langen Basislinien musste eine längere Konvergenzzeit in Kauf genommen werden. Eine möglichst schnelle Lösung der Mehrdeutigkeiten ist im Rahmen dieser Arbeit jedoch ein wichtiger Gesichtspunkt, der über die wirtschaftliche Effizienz einer GNSS-basierten präzisen Positionierung entscheidet. Ohne Fixierung der Mehrdeutigkeiten ist andererseits über kurze Zeitspannen aber auch keine hohe Koordinatengenauigkeit zu erzielen. Daher wird im nachfolgenden Kapitel verstärkt auf das Problem der Mehrdeutigkeitslösung und der gewählten Implementierung eingegangen.

5.2 Methoden der Mehrdeutigkeitslösung

Die Lösung der Mehrdeutigkeiten ist schon seit der Geburt von GPS bzw. seiner präzisen Anwendung ein Arbeitsfeld, das an Aktualität bisher wenig eingebüßt hat. Dementsprechend sind zu diesem Thema zahlreiche Literaturstellen zu finden. Eine Übersicht über verschiedene Methoden findet man beispielsweise in MISRA UND ENGE [2001] und LEICK [1995] aber auch z.B. in WERNER [1999] oder ODIJK [2002].

Ziel der Lösung der Mehrdeutigkeiten N ist es, das Minimum

$$\min = \|N_{\text{FLOAT}} - N_{\text{FIXED}}\|^2 \quad (5-1)$$

zu finden; die Lösungsansätze dafür sind vielfältig. So unterscheidet man z.B. zwischen Ansätzen, die von der Geometrie frei sind (DE JONG [1999] oder JONKMAN [1998]), d.h. die ausschließlich auf Beobachtungsebene arbeiten und keinerlei Kenntnis der aktuellen Position benötigen, und geometriebasierten Ansätzen. Letztere Gruppe ist gegenwärtig weit verbreitet; hierbei wird die aktuelle Position mitgeschätzt, d.h. sie hat einen Einfluss auf die Mehrdeutigkeiten.

Häufig werden Suchmethoden zur Findung der richtigen Mehrdeutigkeiten angewendet, die man in eine Suche im Parameterraum und eine im Beobachtungsraum unterteilen kann. Die unter dem Namen „AFM – Ambiguity Function Method“ (REMONDI [1984] und MADER [1992]) bekannt gewordene Suche im Parameterraum hat sich jedoch für die schnelle Mehrdeutigkeitslösung aufgrund höherer Rechenzeiten und einer i.d.R. schlechteren Unterscheidbarkeit zwischen der erst- und zweitbesten Lösung nicht durchsetzen können. Die Suche im Beobachtungsraum hat sich hingegen zu einem weit verbreiteten Instrument entwickelt (SUTTON [1997] oder HAN UND RIZOS [1998]).

Das Programm SEMIKA verwendet verschiedene Ansätze, wobei auch Kombinationen von Verfahren oder Abwandlungen gängiger Methoden zu finden sind. Die wesentlichen – in SEMIKA implementierten – Ansätze zur Mehrdeutigkeitslösung werden hier vorgestellt, wobei die ergänzten Ansätze zur schnellen Mehrdeutigkeitslösung im Vorder-

grund stehen.

5.2.1 Rundung

Die Rundung zur nächstgelegenen, ganzzahligen Zahl ist die denkbar einfachste Methode der Mehrdeutigkeitsfixierung. Sie ist nach ODIJK [2002] ein „erlaubter Schätzer“ für ganzzahlige Mehrdeutigkeiten. Die in Formel (5-1) aufgestellte Minimierungsbedingung erfüllt er jedoch in praktischer Hinsicht nur in ausreichender Näherung, wenn Daten über einen längeren Zeitraum herangezogen werden und aus diesem Grund eine hinreichende Konvergenz der Fließkomma-Mehrdeutigkeiten auf ihren ganzzahligen Wert erfolgt ist. Für die schnelle Fixierung der originären Mehrdeutigkeiten $N1, N2, \dots$ ist dieses Verfahren jedoch meistens nicht geeignet, da die dazugehörigen Wellenlängen mit ca. 20 cm vergleichsweise klein sind. Anwendbar ist diese Methode jedoch unter Umständen bei Linearkombinationen mit größeren Wellenlängen wie beispielsweise der „Wide Lane“.

5.2.2 Suchmethode im Beobachtungsraum

Der wohl am weitesten verbreitete Algorithmus zur Mehrdeutigkeitsuche wurde von TEUNISSEN [1995] vorgestellt und in den darauf folgenden Jahren ausführlichst dokumentiert (DE JONGE ET AL. [2000] oder TEUNISSEN [2003]) und ist seitdem auch unter dem Namen „LAMBDA-Methode“ (Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment) bekannt.

Unter Berücksichtigung der Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{N}}$ (bzw. der Inversen $W_N = \Sigma_{\hat{N}}^{-1}$) des Vektors der Fließkomma-Mehrdeutigkeiten \hat{N} soll das Minimum gefunden werden bzw. die Minimierungsfunktion nicht größer als eine Schwelle c sein:

$$(\mathbf{N} - \hat{\mathbf{N}})^T W_N (\mathbf{N} - \hat{\mathbf{N}}) \leq c \quad (5-2)$$

Dies führt zu einer Vielzahl von möglichen Mehrdeutigkeiten N , die, wie in Abbildung 5-1 links dargestellt, im zweidimensionalen Fall alle innerhalb einer Ellipse liegen. In der Praxis kann diese Ellipse besonders bei einem Suchzeitraum über wenige Epochen sehr stark abgeflacht sein, daher versucht man durch eine Transformation diese Ellipse einer Kreisform anzunähern.

Wäre nun W_N eine Diagonalmatrix, d.h. die Fließkomma-Mehrdeutigkeiten wären unkorreliert, wäre die Lösung der Minimalfunktion einfach der an die nächstgelegene, ganzzahlige Zahl gerundete Wert der Fließkomma-Mehrdeutigkeit. Transformiert man nun die Mehrdeutigkeiten N bzw. \hat{N} mit Hilfe einer Transformationsmatrix Z ,

$$\mathbf{M} = \mathbf{Z}\mathbf{N} \quad \text{und} \quad \hat{\mathbf{M}} = \mathbf{Z}\hat{\mathbf{N}}, \quad (5-3)$$

werden die Mehrdeutigkeiten entsprechend dekorreliert. Damit für die Mehrdeutigkeiten M ebenfalls ganzzahlige Werte vorliegen, muss die Transformationsmatrix Z ebenfalls ganzzahlige Werte beinhalten, invertierbar sein und ihre Inverse Z^{-1} ebenfalls ganzzahlige Werte enthalten (MISRA UND ENGE [2001]). Im Raum der transformierten Mehrdeutigkeiten

$$(\mathbf{M} - \hat{\mathbf{M}})^T \left((\mathbf{Z}^{-1})^T W_N \mathbf{Z}^{-1} \right) (\mathbf{M} - \hat{\mathbf{M}}) \leq \chi^2 \quad (5-4)$$

kann dann unter der Annahme einer Normalverteilung der Eingangsgrößen mit Hilfe der Chi-Quadrat-Verteilung der nun eher kreisförmige Suchraum (s. Abbildung 5-1 rechts) definiert werden. In der Praxis erfolgt durch die Transformation niemals eine völlige Dekorrelation, so dass nicht einfach eine Rundung auf die nächste ganzzahlige Zahl erfolgen kann. Stattdessen wird eine zeiteffiziente Mehrdeutigkeitsuche vorgenommen; dafür bietet sich die von EULER UND LANDAU [1992] vorgestellte Cholesky-Zerlegung an. Die so im Suchraum fixierten Mehrdeutigkeiten M werden wieder zurücktransformiert:

$$N = Z^{-1}M \quad (5-5)$$

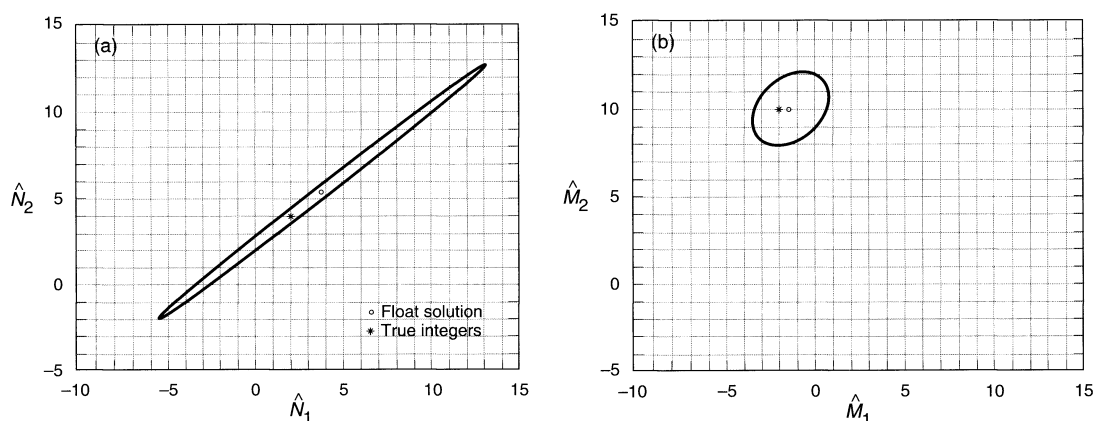


Abbildung 5-1: LAMBDA-Methode: Darstellung der Suchellipse vor (links) und nach (rechts) nach der Transformation, Quelle: MISRA UND ENGE [2001]

Die LAMBDA-Methode erfüllt somit gemäß Formel (5-1) das Minimierungskriterium und kann daher auch als Ganzzahlschätzer nach der Methode der kleinsten Quadratsumme bezeichnet werden. Ein solches Suchverfahren wurde aber im strengen Sinne nicht von Teunissen erfunden, sondern bereits in dieser Zeit auch von verschiedenen anderen Autoren beschrieben (HATCH UND EULER [1994]), allerdings führte Teunissen umfangreichere Untersuchungen durch wie z.B. bezüglich der statistischen Verteilung der ganzzahligen Größen.

Auf diese Weise wird dem Nutzer auch ein Maß für die zu erwartende Erfolgswahrscheinlichkeit („success rate“) an die Hand gegeben. Eine geschlossene Formel ist nach ODIJK [2002] schwer anzugeben, jedoch ist die Wahrscheinlichkeit von der Theorie her stets größer als:

$$P(N_{LAMBDA} = N_{WAHR}) > \left(2\Phi\left(\frac{1}{ADOP}\right) - 1 \right)^q, \quad (5-6)$$

wobei q die Anzahl der Freiheitsgrade ist. Der ADOP (Ambiguity Dilution of Precision) ist nach TEUNISSEN [1997] definiert als

$$ADOP = \sqrt{\det \Sigma_{\hat{N}}^{-1}}. \quad (5-7)$$

Die LAMBDA-Methode ist in SEMIKA implementiert. Jedoch muss nach eigener praktischer Erfahrung die errechnete Erfolgswahrscheinlichkeit mit Vorsicht behandelt werden, wenn das stochastische Modell der Fließkomma-Mehrdeutigkeiten nicht sehr realistisch ist. Genau dies kann bei den bei GPS-Daten auftretenden Autokorrelationen nicht immer garantiert werden, woraus gelegentlich zu optimistische Schätzungen resul-

tieren. Ergänzend wird deshalb noch das in Kapitel 4.3.2.2 Kriterium des „Ambiguity Discrimination Test“ verwendet, was das Verhältnis der besten zur zweitbesten Lösung beurteilt. Dieses Verfahren wird auch von VERHAGEN [2004] beschrieben und hat zumindest den Vorteil, dass es auf empirischen und nicht nur auf theoretischen Grundlagen basiert.

Das Verfahren der LAMBDA-Methode wurde schon in der ursprünglichen Implementierung von SEMIKA eingesetzt, jedoch wird es auf eine vom Nutzer frei wählbare, danach aber fixe Linearkombination angewendet. Es wird nicht der Versuch unternommen, auch die originären Mehrdeutigkeiten zu lösen, d.h. die Positionierung mit den fixierten Mehrdeutigkeiten muss dann zwingend ebenfalls mit der zuvor festgelegten Linearkombination erfolgen. Dieses Vorgehen ist allerdings für diese Arbeit etwas unflexibel und kommt deshalb nicht in dieser Form zum Einsatz. Das Suchverfahren als solches spielt aber bei dem in Kapitel 5.2.4 beschriebenen Kombinationsverfahren und auch bei der Anwendung der sequentiellen Filterung (s. Kapitel 5.2.5) eine große Rolle, da es grundsätzlich für eine schnelle Mehrdeutigkeitsfixierung sehr gut geeignet ist.

5.2.3 Geometriereduzierte Ansätze

Einleitend wurde von geometriefreien und geometriebasierten Ansätzen zur Mehrdeutigkeitslösung gesprochen. Die beiden zuvor beschriebenen Algorithmen arbeiten – so wie sie tatsächlich implementiert wurden – in geometriebasierter Art und Weise, d.h. es wird zunächst eine Schätzung der Position inkl. der Mehrdeutigkeitsparameter (und ggf. weiterer Zusatzparameter) und anschließend eine Fixierung der Mehrdeutigkeiten vorgenommen.

SEMIKA nutzt keine unmittelbar geometriefreien Ansätze, allerdings soll in diesem Abschnitt ein Ansatz vorgestellt werden, der in diesem Zusammenhang als „geometriereduziert“ bezeichnet werden kann. Hierbei wird zunächst ebenfalls eine Positionsschätzung durchgeführt, die als Näherungslösung verwendet wird; im weiteren Verlauf wird dann jedoch rein auf Beobachtungsebene gearbeitet. Es werden nun die Mehrdeutigkeiten von ausgewählten Linearkombinationen fixiert, bei denen die geometriebasierten Restfehler (d.h. im Wesentlichen die Unsicherheiten in den Näherungskoordinaten) nur noch eine untergeordnete Rolle spielen. Der Ansatz für die Bestimmung des ganzzahligen Wertes für die Mehrdeutigkeiten ähnelt dem Ansatz in Referenzstationsnetzwerken (s. Kapitel 4.3.2) – Sortierung, Median, Überdeckungsbereich –, ist jedoch für die Rover-Positionierung und die Verarbeitung von Beobachtungen auf bis zu drei Trägerfrequenzen optimiert worden.

Tabelle 5-1 zeigt die je nach Wahl des Nutzers zum Einsatz kommenden Linearkombinationen. Es sind jeweils zwei verschiedene Blöcke an Linearkombinationen N_A , N_B (und N_C) auswählbar, wobei noch zwischen Kombinationen für den Nahbereich (große Ionosphären-Verstärkung) und den Fernbereich (gemäßigte Ionosphären-Verstärkung) unterschieden wird. Somit berechnen sich z.B. für drei Frequenzen die Original-Mehrdeutigkeiten N_1 , N_2 und N_3 nach

$$\begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} N_A \\ N_B \\ N_C \end{pmatrix}. \quad (5-8)$$

Es kann auf Wunsch des Nutzers durch Hinzunahme einer dritten Linearkombination bei zwei Frequenzen bzw. einer vierten Linearkombination bei drei Frequenzen eine Ve-

rifizierung der gefundenen Mehrdeutigkeiten auf den Originalträgern ($N1$, $N2$ und ggf. $N3$) erfolgen. Für drei Original-Mehrdeutigkeiten hätte man somit jeweils vier mögliche Mehrdeutigkeiten, die alle miteinander übereinstimmen müssen.

GPS					Galileo				
Frequenz	Nahbereich		Fernbereich		Frequenz	Nahbereich		Fernbereich	
	LK 1	LK 2	LK 1	LK 2		LK 1	LK 2	LK 1	LK 2
$L1/L2$	(7/9)	---	(2/3)	(3/4)	$E1/E5a$	(5/7)	(23/31)	(2/3)	(5/7)
	4/5	---	1/1	1/1		3/4	3/4	1/1	1/1
	3/4	---	1/2	2/3		2/3	11/15	1/2	2/3
$L1/L5$	(5/7)	(23/31)	(2/3)	(5/7)	$E1/E6$	(13/16)	---	(2/3)	(4/5)
	3/4	3/4	1/1	1/1		4/5	---	1/1	1/1
	2/3	11/15	1/2	2/3		9/11	---	1/2	2/3
$L1/L2/L5$	1/1/1	6/1/7	1/1/1	1/1/-1	$E1/E5a/E6$	1/1/1	4/1/4	1/1/1	2/2/1
	1/4/-3	3/1/3	1/6/-5	1/1/1		1/-2/3	3/3/1	1/-2/3	1/3/-1
	1/5/-4	1/6/-5	1/5/-4	2/-1/4		1/3/-1	2/7/-4	1/3/-1	1/-2/3
	(2/2/1)	(2/2/1)	(2/2/1)	(2/2/1)		(3/2/2)	(3/2/2)	(2/2/1)	(3/2/2)
					$E1/E5b$	(13/17)	(13/17)	(2/3)	(3/4)
						3/4	10/13	1/1	1/1
						7/9	3/4	1/2	2/3
					$E1/E5a/E5b$	1/1/1	3/3/1	1/1/1	2/2/1
						1/3/-1	3/2/2	1/3/-1	1/3/-1
						1/-8/9	1/-8/9	1/-8/9	1/-8/9
						(4/1/4)	(4/1/4)	(4/1/4)	(4/1/4)

Tabelle 5-1: Für den geometriereduzierten Ansatz verwendete Linearkombinationen; hierbei gibt es jeweils zwei mögliche Sets an Linearkombinationen für den Nahbereich und den Fernbereich; die in Klammern gesetzten Linearkombinationen werden nur verwendet, wenn der Nutzer eine Überbestimmung und somit eine Kontrolle der Mehrdeutigkeitsfixierung wünscht.

Die in Tabelle 5-1 getroffene Auswahl an geeigneten Linearkombinationen werden z.T. auch von z.B. FENG [2004] oder RICHERT UND EL-SHEIMY [2007] verwendet.

Die hier beschriebene Lösungsmethodik kommt im Rahmen dieser Arbeit zumeist nur mit den Linearkombinationen für den Fernbereich in Frage. Allerdings erfordert es vergleichsweise hochgenaue ionosphärische Korrekturen. Aber auch in den Flächenkorrekturparametern sind Restfehler enthalten – wie die Ergebnisse in Kapitel 4.6 zeigen, liegt die mittlere Standardabweichung der Differenzen bei ungeglätteten Daten bei knapp 2 cm –, so kann das Verfahren trotzdem versagen, da die nötigen geometriereduzierten Linearkombinationen eine bereits zu hohe Ionosphärenverstärkung aufweisen können. Eine Anwendung im Rahmen dieser Arbeit wurde – von Testzwecken abgesehen – daher unterlassen. Die Grundsätze dieser Methode kommen allerdings im nachfolgend beschriebenen Kombinationsverfahren als ein Element zum Tragen.

5.2.4 Schnelle Mehrdeutigkeitslösung (Kombinationsverfahren)

Bei dieser Variante der schnellen Mehrdeutigkeitslösung kommt eine Kombination verschiedener Ansätze zum Einsatz, die in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wurde. Das hier implementierte Verfahren arbeitet kaskadierend, darf aber nicht mit der klassischen Herangehensweise, wie sie z.B. von HATCH ET AL. [2000] beschrieben wurde, verwechselt werden – dort wird ausschließlich auf geometriefreier Ebene gearbeitet, was

bei dem hier vorgestellten Ansatz nicht der Fall ist.

Die schnelle Mehrdeutigkeitslösung setzt sich aus drei Schritten zusammen:

- (1) Nach Vorliegen einer Fließkomma-Schätzung wird mit Hilfe der LAMBDA-Methode (s. Kapitel 5.2.2) die ganzzahlige Mehrdeutigkeit einer Linearkombination ermittelt. Die gewählte Linearkombination ist ein Kompromiss aus einer möglichst großen Wellenlänge, einem möglichst moderaten Einfluss der Ionosphäre und einem gleichzeitig möglichst geringen Rauschen. Als Grenzwert für das Rauschniveau dieser Linearkombination soll gelten, dass die Standardabweichung (inkl. dem Einfluss der Mehrwege-Effekte) der linear kombinierten Trägerphasen geringer ist als die der nicht linear kombinierten Pseudostrecken. Alle diese Kriterien sind nicht streng zu erfüllen, jedoch kann die bekannte „Wide Lane“ als Kompromiss dienen, da sie je nach Signalkombination eine virtuelle Wellenlänge von ca. 80-100 cm aufweist und der ionosphärische Verstärkungsfaktor einen Wert von etwas über eins (1,3) besitzt; das Rauschniveau ist im Verhältnis zur Wellenlänge akzeptabel und ermöglicht trotzdem noch eine ausreichend genaue Positionsbestimmung für den nächsten Schritt. Die für die verschiedenen Signalkombinationen verwendete „Wide Lane“ ist jeweils in der ersten Zeile der Tabelle 5-2 aufgeführt. Anzumerken ist noch, dass in diesem Lösungsschritt indirekt die Genauigkeit der Pseudostrecken eine wichtige Rolle spielen, mehr dazu in Kapitel 5.3.

Signale	Fixierung			Positionierung
	Linear-kombination	Wellenlänge λ_{LK} [mm]	$\frac{ION_{LK}[m]}{ION_{L1L2}[m]}$	Linear-kombination
<i>L1/L2</i>	1/1	862	1,3	<i>L_{if} 77/60</i>
	2/3	564	5,5	
<i>L1/L5</i> <i>E1/E5a</i>	1/1	751	1,3	<i>L_{if} 154/115</i>
	1/2	386	2,5	
<i>E1/E5b</i>	1/1	814	1,3	<i>L_{if} 77/59</i>
	2/3	637	6,4	
<i>E1/E6</i>	1/1	1011	1,2	<i>L_{if} 154/125</i>
	2/3	437	3,9	
<i>L1/L2/L5</i>	1/1/0	862	1,3	<i>L_{if} 154/115</i>
	0/-1/1	5861	1,0	
	2/2/1	624	6,2	
<i>E1/E5a/E6</i>	1/0/1	1011	1,2	<i>L_{if} 154/115</i>
	0/1/-1	2931	1,1	
	1/3/-1	444	4,2	
<i>E1/E5a/E5b</i>	1/0/1	814	1,3	<i>L_{if} 154/115</i>
	0/1/-1	9768	1,0	
	1/3/-1	401	3,6	
<i>E1/E5a/E5ab</i>	1/0/1	781	1,3	<i>L_{if} 154/115</i>
	0/1/-1	9537	1,0	
	1/-1/3	364	3,1	

Tabelle 5-2: Für Kombinationsverfahren verwendete Linearkombinationen

- (2) Nach erfolgreicher Fixierung der ersten Linearkombination wird nun versucht, unter Ausnutzung des geometriereduzierten Ansatzes eine entsprechend geeignete Linearkombination zu fixieren. Dabei wird auf die aus dem vorhergehenden Schritt verbesserte Näherungsposition aufgebaut. Es wird eine Linearkombination gewählt, die eine möglichst große Wellenlänge bei einem gleichzeitig möglichst geringen Ionosphären-einfluss und guter Kompensation geometrischer Restfehler gewählt. Auch hier muss

ein Kompromiss gefunden werden; z.B. wird für GPS $L1/L2$ die Linearkombination $L_{2,3}$ gewählt, mit einem ionosphärischen Verstärkungsfaktor von „nur“ 5,5, aber einer Wellenlänge von immerhin einem halben Meter. Werden Beobachtungen auf drei Frequenzen verwendet, so ergeben sich durch Nutzung der „Super Wide Lane“ interessante Alternativen: für GPS $L2/L5$ mit einer Wellenlänge von knapp 6 m, z.B. für GALILEO $E5a/E5b$ sogar mit einer Wellenlänge von knapp 10 m. Bei 3-Frequenz-Messungen müssen aber, um die originären Mehrdeutigkeiten $N1$, $N2$ und $N3$ ermitteln zu können, zwei solche geometriereduzierten Linearkombinationen verwendet werden.

Aus den zwei bzw. drei fixierten Mehrdeutigkeiten der Linearkombinationen erhält man für zwei Frequenzen analog nach Formel (4-3) die Mehrdeutigkeiten für $N1$ und $N2$, bei Verwendung von Beobachtungen auf drei Frequenzen analog zu Formel (5-8) – will man eine Matrixinvertierung umgehen, so gelten folgende Beziehungen:

$$\begin{aligned} N_1 &= [(b_2c_3 - b_3c_2)N_A + (a_3c_2 - a_2c_3)N_B + (a_2b_3 - a_3b_2)N_C] / q \\ N_2 &= [(b_1c_3 - b_3c_1)N_A + (a_3c_1 - a_1c_3)N_B + (a_1b_3 - a_3b_1)N_C] / q \\ N_3 &= [(b_2c_1 - b_1c_2)N_A + (a_1c_2 - a_2c_1)N_B + (a_2b_1 - a_1b_2)N_C] / q \\ q &= a_1(b_2c_3 - b_3c_2) + a_2(b_3c_1 - b_1c_3) + a_3(b_1c_2 - b_2c_1) \end{aligned} \quad (5-9)$$

- (3) Nach erfolgter Fixierung der originären Mehrdeutigkeiten wird nun jedoch die ionosphärenfreie Linearkombination zur Ermittlung der endgültigen Position genutzt, denn damit können eventuelle ionosphärische Restfehler komplett eliminiert werden. Insbesondere wenn Beobachtungen auf drei Frequenzen zur Verfügung stehen, sind mehrere Linearkombinationen zur Positionierung denkbar, es wird jedoch diejenige gewählt, die das geringste Rauschniveau (also den größten Frequenzabstand) aufweist.

Dieses Verfahren wurde in dieser Arbeit zur Prozessierung realer GPS 2-Frequenz-Daten recht intensiv genutzt, da es sich für die schnelle Mehrdeutigkeitslösung sehr gut eignet. Allerdings ist der Erfolg maßgeblich von den zur Verfügung gestellten ionosphärischen und troposphärischen Korrekturen abhängig. Im nächsten Unterkapitel wird deshalb eine Alternative vorgestellt, die aktiv aus den Daten zusätzlich atmosphärische Restfehler mitschätzen kann. Diese alternative Methode zeigte sich im Laufe dieser Arbeit als leistungsfähigere Methode zur Prozessierung auch von mit vergleichsweise starken atmosphärischen Fehlern behafteten Daten.

5.2.5 ANSA: Kalman-Filterung unter Mitschätzung aller Störgrößen

Zur Erzielung einer größtmöglichen Flexibilität wurde als zweite wesentliche Verbesserung eine Methode zur Mehrdeutigkeitslösung entwickelt, die auf einem sequentiellen Filterprozess basiert.

An Stelle der PDGPS-Blockausgleichung wird zunächst ein Kalman-Filter angewendet, das die Zielparameter – also die Mehrdeutigkeiten und die (vorläufige) Roverposition – sowie alle anderen Störparameter mitschätzt (auch ANSA – All-Inclusive Sequential Ambiguity Estimator genannt). In diesem Zusammenhang sei bzgl. der allgemeinen formelmäßigen Beschreibung eines Kalman-Filters auf Kapitel 2.5.2 in SCHÜLER [2001] verwiesen.

Neben den Mehrdeutigkeiten sind also die atmosphärischen Fehlergrößen Bestandteile des Parametervektors. Auf diese Weise kann eine größere Unabhängigkeit vom Referenzstationsnetzwerk erzielt werden, da dessen Atmosphärenkorrekturen aufgrund der

durchgeführten Selbstschätzung nicht mehr so bedeutsam sind. Dieser Ansatz führt aber nur dann schnell zur Fixierung der Mehrdeutigkeiten, wenn die Pseudostrecken eine hohe Genauigkeit aufweisen – mit GALILEO E5a/E5b/E5ab hat man hier einen großen Vorteil – und eine gute Abdeckung mit Satelliten sichergestellt ist, so dass man keine Konvergenzprobleme hat – hier ist die Kombination von GPS und GALILEO ein großer Vorteil.

Nach jeder Filterepoche wird versucht, die Mehrdeutigkeiten der Originalträger mit Hilfe der LAMBDA-Suchmethode (Kapitel 5.2.2) zu fixieren; sobald dieses gelingt, wird parallel eine PDGPS-Einzelepochenlösung durchgeführt, bei der dann nur noch die Trägerphasenmessungen verwendet werden.

Der Algorithmus verwendet für Distanzen zu der/den verwendeten Referenzstation(en) größer als ca. 10 km die ionosphärenfreie Linearkombination als Linearkombination für die PDGPS-Einzelepochenlösung, für geringere Distanzen die „Narrow Lane“, die zwar den – dann nicht mehr so starken – Ionosphäreinfluss enthält, jedoch erheblich rauschärmer ist.

5.2.5.1 Beobachtungs- und Zustandsvektor

Im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Lösungsansätzen werden hier nicht spezielle Linearkombinationen genutzt, sondern es werden unmittelbar die Mehrdeutigkeiten auf den Original-Trägerfrequenzen ermittelt. Dementsprechend dienen als Beobachtungsgrößen auch nicht die linear kombinierten Trägerphasen, sondern die Originalbeobachtungen; des Weiteren werden neben den Trägerphasen auch die Pseudostrecken in den Beobachtungsvektor L mit aufgenommen:

$$L = \begin{pmatrix} \nabla \Delta PR_{AB}^{ij} \\ \nabla \Delta PR_{AB}^{ik} \\ \vdots \\ \nabla \Delta \phi_{AB}^{ij} \\ \nabla \Delta \phi_{AB}^{ik} \\ \vdots \end{pmatrix}. \quad (5-10)$$

Der Zustandsvektor X

$$X = \begin{pmatrix} (x_A \ y_A \ z_A)^T \\ (\nabla \Delta N_{ABL1}^{ij} \ \nabla \Delta N_{ABL1}^{ik} \ \cdots \ \nabla \Delta N_{ABL2}^{ij} \ \nabla \Delta N_{ABL2}^{ik} \ \cdots)^T \\ ZPD_A \\ (\nabla \Delta ION_{ABL1}^{ij} \ \nabla \Delta ION_{ABL1}^{ik} \ \cdots)^T \end{pmatrix} \quad (5-11)$$

besteht aus

- (1) den drei kartesischen Koordinatenkomponenten des Rovers A – die Koordinaten der Referenzstationen B, \dots werden festgehalten,
- (2) den originären Mehrdeutigkeiten für jeden Satelliten auf allen Trägerfrequenzen,
- (3) der residuellen troposphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung – es wird hier unterstellt, dass keine signifikanten azimuthalen Variationen vorliegen, was zumeist gerechtfertigt ist; durch die stationsspezifische Modellierung kann die Anzahl der Parameter deutlich reduziert werden – sowie
- (4) der residuellen ionosphärischen Laufzeitverzögerung, immer auf $L1$ bezogen, in Rich-

tion des Satelliten, aber doppelt differenziert – hier wird also eine satellitenspezifische Modellierung durchgeführt, da die ionosphärischen Subpunkte im Gegensatz zur Troposphäre bis zu ca. 1000 km weit auseinander liegen können.

5.2.5.2 Transitionsmatrix und Systemrauschen

Die zeitliche Variation aller Zustände wird nicht durch Grundannahmen – wie z.B. eine kinematische Modellierung einer gleichförmig beschleunigten Bewegung in Form eines Polynoms 2. Ordnung – dargestellt, sondern wird rein stochastisch modelliert; somit wird die Transitionsmatrix zur Epoche k zur Einheitsmatrix:

$$T_k = E \quad (5-12)$$

Die vermutete zeitliche Variabilität der Parameter wird dem Filter stattdessen durch eine adäquate Erhöhung des Varianzniveaus der Kovarianzmatrix der prädizierten Zustände mitgeteilt. Diese Aufgabe übernimmt die Systemrauschmatrix Σ_{SS} , so dass die Kovarianzmatrix des prädizierten Zustandsvektors Σ_{XX_k} folgende Form hat:

$$\Sigma_{XX_k} = T \Sigma_{XX_{k-1}}^* T^T + \Sigma_{SS} = \Sigma_{XX_{k-1}}^* + \Sigma_{SS} \quad (5-13)$$

Σ_{XX} : Kovarianzmatrix des prädizierten Zustandsvektors (zur Epoche k)

Σ_{XX}^* : Kovarianzmatrix des aufdatierten Zustandsvektors (zur Epoche $k-1$)

Σ_{SS} : Systemrauschmatrix; hier eine Diagonalmatrix

T : Transitionsmatrix

Die einzelnen Varianzen der Systemrauschmatrix sind z.B. für die Koordinaten durch $\sigma_{x,y,z}^2 = q_{x,y,z}^2 \cdot \Delta t$ definiert, wobei $q_{x,y,z}$ das so genannte Prozessrauschen in einer Einheit von mm/\sqrt{h} ist. Entsprechend den verschiedenen Gruppen von Parametern hat man es also mit dem

- Prozessrauschen der Position $q_{x,y,z}$,
- Prozessrauschen der Mehrdeutigkeiten q_N ,
- Prozessrauschen der Troposphäre in Zenitrichtung q_{ZPD} sowie dem
- Prozessrauschen der doppelt differenzierten Ionosphäre in Satellitenrichtung q_{ION}

zu tun. Damit kann man nun durch eine geeignete Wahl der Prozessrauschkoeffizienten sehr flexibel auf unterschiedliche Situationen reagieren:

- a) der Rover bewegt sich nicht: $q_{x,y,z}$ wird nahe null gewählt, d.h. das Filter „zieht sich schnell zusammen“ oder anders ausgedrückt: die Varianz der Koordinatenparameter nimmt mit der Zeit schnell ab, da Beobachtungen über die Zeit mit hohem Gewicht akkumuliert werden (schnelle Konvergenz).
- b) der Rover bewegt sich: $q_{x,y,z}$ wird entsprechend der erwarteten Bewegungsraten von Epoche k zu Epoche $k+1$ mit einem höheren Zahlenwert gewählt.
- c) Die zeitliche Variation der Atmosphärenzustände muss entsprechend abgeschätzt werden. So verändert sich die Troposphäre in Zenitrichtung über eine Stunde i.d.R. nur unwesentlich, hier kann q_{ZPD} mit $1\text{ cm}/\sqrt{h}$ gewählt werden. Eine Abschätzung der Ionosphärenvariation ist schon ein wenig schwieriger, da auch eine Elevationsabhängigkeit besteht sowie unter ungünstigen Bedingungen auch stärkere Variationen auftreten können; somit sollte q_{ION} mindestens so groß wie q_{ZPD} gewählt werden, im Zweifelsfall eher etwas höher.

5.2.5.3 Initialisierung des Filters

Neben dem Aspekt des Systemrauschens spielt die Initialisierung des Filters eine wichtige Rolle. Dies umfasst sowohl den Zustandsvektor X als auch die dazugehörige Kovarianzmatrix Σ_{xx} . Für die Koordinaten gilt, dass die aus Pseudostrecken ermittelte Position zur Initialisierung herangezogen wird (DGPS-Lösung, Schritt (1) in Kapitel 5.1.1). Approximative Mehrdeutigkeiten werden aus der Kombination von Pseudostrecken und Trägerphasen gewonnen. Für die Ionosphäre und die Troposphäre werden generell die residuellen Laufzeitverzögerungen geschätzt, d.h. die Differenz zu den vorliegenden, modellierten bzw. aus dem GPS-Referenzstationsnetzwerk geschätzten Laufzeitverzögerungen; somit erfolgt stets eine Initialisierung mit dem Wert null, da die Schätzwerte generell als kleine Größe angenommen werden.

Für die Initialisierung der Kovarianzmatrix gilt, dass die Standardabweichung der Koordinaten aus Untersuchungen näherungsweise bekannt ist, s. Kapitel 5.3. Die Standardabweichung der Mehrdeutigkeiten darf recht hoch angesetzt werden, da bei einer Initialisierung von bspw. ± 99 Zyklen nach einer Filteraufdatierung durch die Wirkung der Pseudostrecken das Filter schnell konvergiert. Wie die Kovarianzen der Ionosphäre und Troposphäre angesetzt werden, hängt von der *à priori* Modellierung ab: werden Flächenkorrekturparameter verwendet, d.h. es liegen präzise, mit NEREUS abgeleitete Atmosphärenkorrekturen vor, so können unter normalen Verhältnissen Kovarianzen von 1-3 cm angesetzt werden. Ist allerdings mit starken ionosphärischen Störungen zu rechnen (und damit mit höheren Approximationsfehlern in den Flächenkorrekturparametern), sollte die Kovarianz eher im dm-Bereich gewählt werden. Auch bei der Verwendung einfacherer Modelle sollten größere Werte verwendet werden, z.B. bei TropGrid für die Troposphäre mind. 5 cm. Die konkrete Wahl verlangt gewisse Kenntnisse des jeweiligen Atmosphärenzustandes.

Eine Besonderheit sei noch erwähnt: es können noch atmosphärische Laufzeitverzögerungen als zusätzliche Pseudobeobachtungen (im englischen Sprachgebrauch häufig auch als „constraints“ bezeichnet) mit frei wählbarer Standardabweichung in den Beobachtungsvektor eingeführt werden. Dies ist eine stützende Maßnahme, die vor einer Divergenz des Filters schützt, die auftreten kann, wenn zu wenige Satelliten beobachtet werden bzw. eine ungünstige Satellitenkonstellation vorliegt. Die Standardabweichung dieser Pseudobeobachtungen ist ebenfalls – separat von der Initialisierung des Zustandsvektors – vom Nutzer individuell für die Ionosphäre und Troposphäre definierbar, die Größenordnungen orientieren sich aber zumeist an den zuvor genannten Größen.

5.3 Anmerkungen zur Positionierung

Der Positionierungsalgorithmus von SEMIKA wird in Kapitel 2.2.1.4 in SCHÜLER [2006b] detailliert dargestellt. In dieser Arbeit ist jedoch als Besonderheit zu beachten, dass nach vergleichsweise kurzer Zeit eine präzise Position vorliegen soll. Die Mehrdeutigkeiten können unter dieser Randbedingung aber meist nur dann rechtzeitig gelöst werden, wenn die Pseudostrecken genutzt werden – entweder direkt oder indirekt.

Im vorhergehenden Abschnitt wurde das Kalman-Filter als Hilfsmittel zur Mehrdeutigkeitsbestimmung vorgestellt. Bei dieser neuen Implementierung wird eine direkte Verarbeitung der Pseudostrecken- und Trägerphasenmessungen durchgeführt, d.h. beide Beobachtungsgruppen finden sich im Beobachtungsvektor wieder.

In der klassischen Implementierung, wie sie für die schnelle Mehrdeutigkeitslösung (s. Kombinationsverfahren aus Kapitel 5.2.4) zum Einsatz kommt, erfolgt in SEMIKA indirekt die Nutzung der Pseudostrecken: indem die aus ihnen ermittelte (geglättete) Position

als Pseudobeobachtung im Beobachtungsvektor mit aufgenommen wird:

$$L = \begin{pmatrix} (\nabla\Delta\phi_{AB_k}^j \ \nabla\Delta\phi_{AB_k}^{jk} \ \dots \ \nabla\Delta\phi_{AC_k}^j \ \nabla\Delta\phi_{AC_k}^{jk} \ \dots)^T \\ (\nabla\Delta\phi_{AB_{k+1}}^j \ \nabla\Delta\phi_{AB_{k+1}}^{jk} \ \dots \ \nabla\Delta\phi_{AC_{k+1}}^j \ \nabla\Delta\phi_{AC_{k+1}}^{jk} \ \dots)^T \\ \vdots \\ (x_k \ y_k \ z_k \ x_{k+1} \ y_{k+1} \ z_{k+1} \ \dots)^T \end{pmatrix} \quad (5-14)$$

Dabei stellt sich die Frage, wie genau die Pseudostrecken-Lösung bei einem hochwertigen geodätischen Empfänger sein kann. Hierzu wurden mit Hilfe von simulierten Beobachtungsdaten (s. Kapitel 6) über einen Zeitraum von zwei Stunden unter moderaten ionosphärischen und troposphärischen Bedingungen sowie mit durchschnittlichem Mehrwege-Einfluss die Standardabweichung der DGPS-Position mit Hilfe von SEMIKA durchgeführt. Die Ergebnisse für 10 s, 20 s, 40 s, 60 s, 90 s und 120 s Zeitintervalle sind in Tabelle 5-3 zusammengestellt. Hierbei wird nach den zur Verfügung stehenden

	10 sec	20 sec	40 sec	60 sec	90 sec	120 sec
GPS L1	0,85	0,72	0,56	0,48	0,40	0,38
GALILEO E1	0,72	0,60	0,49			
GPS L1 + GALILEO E1	0,53	0,42	0,35			
GALILEO E5a	0,26	0,21	0,17			
GPS L5	0,63	0,53	0,43	0,41	0,35	0,35
GPS L5 + GALILEO E5a	0,29	0,24	0,19	0,17	0,16	0,15

Tabelle 5-3: Zweistündige Mittelwerte der DGPS-Positionsabweichungen [m]

Beobachtungsdaten unterschieden: nur GPS L1 oder L5, nur GALILEO E1, GPS L1 und GALILEO E1 sowie GPS L5 und GALILEO E5a. Man sieht zum einen die besseren Mehrwege-Eigenschaften des GPS L5 und GALILEO E5a Signals, zum anderen aber auch den deutlichen Vorteil der gleichzeitigen Nutzung zweier Satellitennavigationssysteme.

5.4 Ergebnisse aus realen Beobachtungen

In diesem Kapitel sollen – analog zum Vorgehen in Kapitel 4 – Ergebnisse für die schnelle präzise Positionierung mit echten Daten, d.h. GPS Zwei-Frequenz-Beobachtungen, dargestellt werden. Zunächst wird anhand von anonymen Nutzerprotokollauswertungen, die vom Landesamt für Vermessung und Geoinformation Bayern freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden, der gegenwärtige Stand der schnellen präzisen GPS-Positionierung im SAPOS[®]-Teilnetz Bayern dargestellt. D.h. es wird die Frage beantwortet, welche Zeit unter Verwendung heutzutage üblicher kommerzieller Software vergeht, bis die Mehrdeutigkeiten fixiert werden können und dann eine präzise PDGPS-Lösung dem Nutzer zur Verfügung steht.

Anschließend werden Ergebnisse mit der eigenen Software (NEREUS und SEMIKA) für die Teilnetze Thüringen und Bayern vorgestellt. Dabei wird demonstriert, dass sich die Leistungsfähigkeit der eigenen Software nicht von jener kommerzieller Anbieter unterscheidet, was für diese Arbeit von erheblicher Bedeutung ist.

5.4.1 Gegenwärtiger Stand (SAPOS®-Teilnetz Bayern)

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der gegenwärtigen Positionierung mit qualitativ hochwertigen geodätischen Zweifrequenzempfängern wurden Nutzerdaten analysiert. Diese Nutzerdaten sind XML Reporting Files der Firma Trimble Terrasat, in denen neben dem Nutzer und der Entfernung zur nächstgelegenen Referenzstation der Startzeitpunkt (Einloggen in den HEPS-Dienst bzw. Anschalten des Empfängers), der Zeitpunkt einer Einzelstationslösung, einer DGPS-Lösung und der ersten RTK-Lösung – also Mehrdeutigkeitsfixierung und PDGPS-Lösung – abgespeichert sind. Es wurden Daten für drei komplette Tage, 9.-11. Mai 2006, im gesamten SAPOS®-Netz Bayern, also für alle Nutzer, die in diesem Zeitraum den HEPS-Dienst genutzt haben, anonymisiert ausgewertet. Diese statistische Analyse gibt einen Hinweis, wie lange heutige Software benötigt, bis dem Nutzer eine präzise Position an die Hand gegeben werden kann, also ab wann eine Fixierung der Mehrdeutigkeiten erfolgreich war.

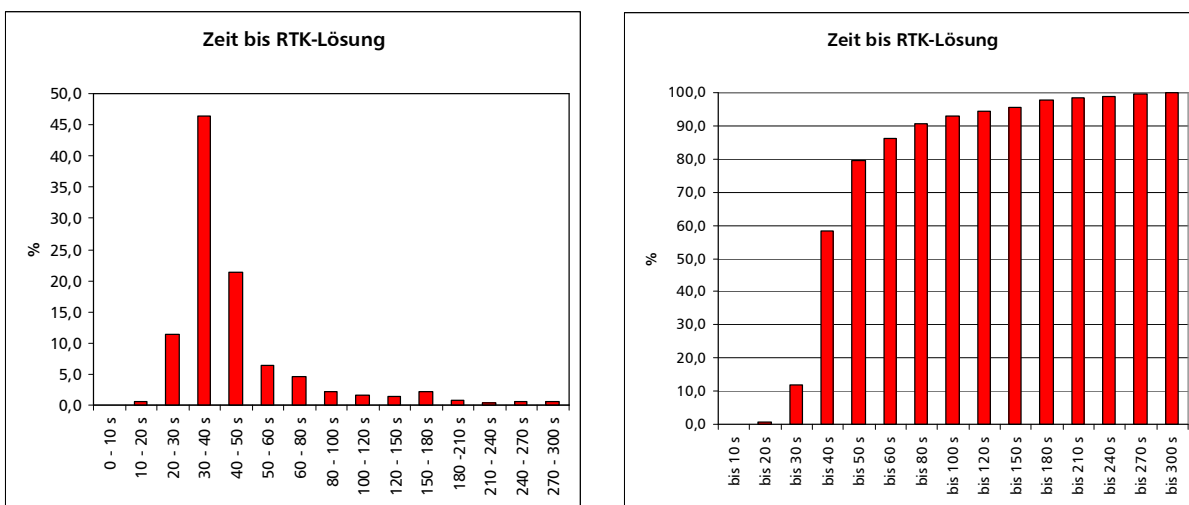


Abbildung 5-2: Zeit bis zu einer RTK-Lösung, abgeleitet aus bayerischen SAPOS®-Nutzerdaten im Zeitraum 9.-11. Mai 2006, bereitgestellt von der LVG Bayern; Fixierungszeiträume größer 5 min wurden nicht berücksichtigt; links Darstellung als Histogramm, rechts kumuliertes Histogramm

In Abbildung 5-2 sind die Ergebnisse – also die Zeit, die vom Anschalten des Empfängers bis zu einer RTK-Lösung vergeht – als Histogramm dargestellt; hierbei wurden für Zeiten kleiner als eine Minute eine Klassenbreite von 10 s gewählt, für Zeiten von 1-2 min eine Klassenbreite von 20 s und für Zeiten zwischen 2 und 5 min eine Klassenbreite von 30 s, Fixierungszeiten größer als 5 min wurden in der Analyse nicht berücksichtigt. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass in fast 60% der Fälle nach nur 40 s eine Fixierung vorgenommen werden konnte, während nach 120 s dann 95% dem Nutzer eine fixierte PDGPS-Lösung zur Verfügung steht. Dazu ist noch zu sagen, dass das Teilnetz Bayern vergleichsweise große Stationsabstände aufweist, in anderen Regionen also mit einer noch geringfügig schnelleren Konvergenzzeit gerechnet werden könnte. Zum anderen waren aber zum Untersuchungszeitpunkt die Ionosphärenverhältnisse eher moderat.

Im Folgenden wird aufgezeigt, dass die selbstentwickelte Software (Kombination NEREUS und SEMIKA) mindestens das gleiche Leistungspotential aufweist.

5.4.2 Ergebnisse aus dem SAPOS®-Teilnetz Thüringen

Wie in Kapitel 4.6.2 erwähnt, standen RINEX-Daten für den Zeitraum 11.-13. Sep-

tember 2005 zur Verfügung. Das thüringische Landesamt für Vermessung und Geoinformation stellt auf seiner Homepage des SAPOS[®]-Webservers (<http://www.sapos.thueringen.de>) Informationen über die ionosphärischen und troposphärischen Verhältnisse der vergangenen zehn Monate dar. Es handelt sich hierbei im Detail um den ionosphärischen Index *I*₉₅ und den zu erwartenden ionosphärischen sowie geometrischen Modellrestfehler. Diese drei Parameter werden im Folgenden kurz erläutert und für die entsprechenden drei Tage dargestellt.

Der ionosphärische *I*₉₅ Index gibt nach WANNINGER [2004] den differentiellen ionosphärischen Fehler in einem Referenzstationsnetz in ppm an, wobei die schlechtesten (größten) 5% außer Acht gelassen werden – diese 95%-Grenze wurde gewählt, da man davon ausgeht, dass die jeweils am stärksten betroffenen Beobachtungen von einer Auswertesoftware identifiziert und eliminiert werden können. Dieser maximale Fehler ΔI setzt sich aus einer Breiten- und Längskomponente zusammen:

$$\Delta I = \sqrt{\Delta I_{BREITE}^2 + \Delta I_{LÄNGE}^2} \tag{5-15}$$

In Abbildung 5-3 links ist der differentielle ionosphärische Fehler für verschiedene Ionosphärenverhältnisse dargestellt. So hat eine Ionosphäre mit einem zwar hohen Elektronengehalt von ca. $50 \cdot 10^{16}$ el/m² in Zenitrichtung, aber keinen sonstigen Störungen nur einen *I*₉₅-Wert von 5 zur Folge. Klein- und mittelmaßstäbige wandernde Ionosphärenstörungen (s. Kapitel 3.1.2) hingegen verursachen zwar einen eher normalen vertikalen Elektronengehalt von ca. $11 \cdot 10^{16}$ el/m², jedoch beträgt der maximale differentielle ionosphärische Fehler (*I*₉₅) 13 ppm. Im rechten Teil der Abbildung 5-3 sind gut die Zeiträume stärkerer ionosphärischer Aktivität zu sehen – zum einen während des Maximums der Sonnenfleckenaktivität (s. auch Abbildung 3-2) und zum anderen zur lokalen Mittagszeit.

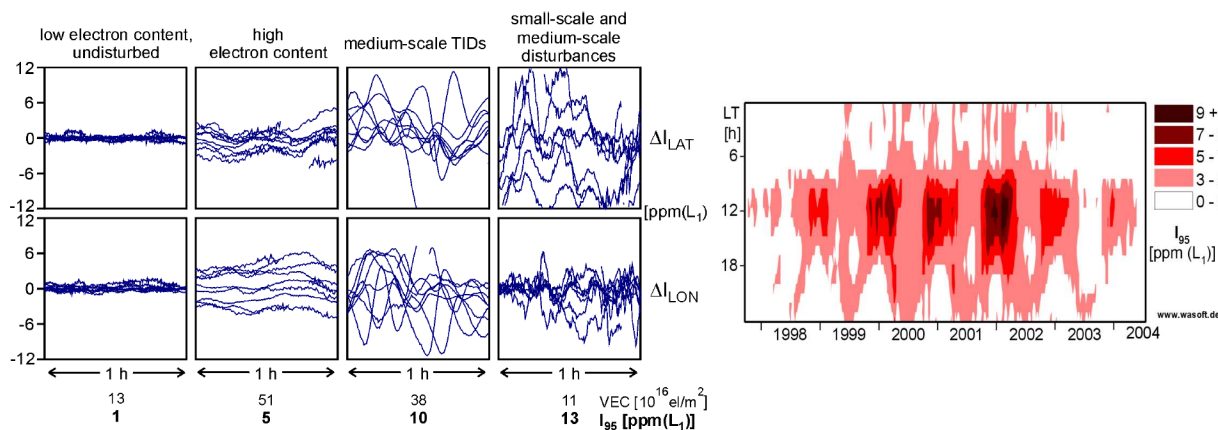


Abbildung 5-3: links: differentieller ionosphärischer Fehler in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung sowie *I*₉₅ Index und vertikaler Elektronengehalt unter verschiedenen ionosphärischen Bedingungen; rechts: wöchentliche Mittelwerte des stündlichen *I*₉₅-Index in Deutschland; Quelle: WANNINGER [2004]

Für das thüringische SAPOS[®]-Teilnetz ist in Abbildung 5-4 der stündliche *I*₉₅-Wert für den 11.-13. September 2005 dargestellt. Durch waagrechte Trennlinien wird hierbei zwischen Bereichen ohne ionosphärische Störungen (*I*₉₅<2), mit geringen ionosphärischen Störungen (2≤*I*₉₅<4) und stärkeren (4≤*I*₉₅<8) bzw. sehr starken (*I*₉₅≥8) ionosphärischen Störungen unterschieden.

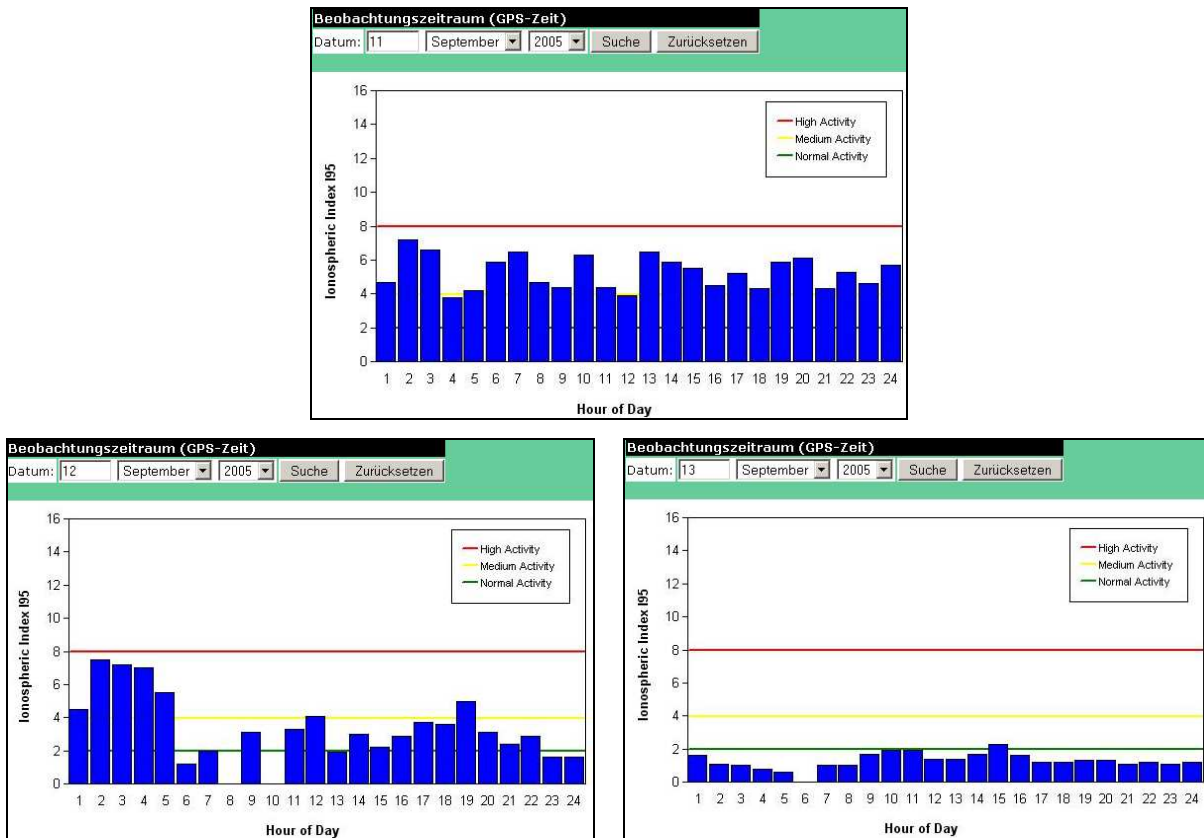


Abbildung 5-4: Ionosphärischer Index I95 für das thüringische SAPOS[®]-Netz im Zeitraum 11.-13. September 2005 (Quelle: <http://www.sapos.thueringen.de>)

Die Abbildung 5-5 mit den ionosphärischen Modellrestfehlern ist ebenfalls eine generalisierte – stündliche Tagesgrafik. Nach BALKENKOHL UND HEINZ [2006] werden hierzu intern die Modellrestfehler für jede Referenzstation einzeln berechnet, aber für die Grafik zusammengefasst, obwohl stationsbezogene Restfehler u.U. erheblich differieren können. Diese Restfehler werden aus den Residuen bzw. Standardabweichungen der Berechnung der Ionosphärenfehler ermittelt, d.h. je höher die Residuen sind, desto weniger trifft das Ionosphärenmodell die aktuelle ionosphärische Wirklichkeit. Hierbei handelt es sich um die von Trimble Terrasat propagierte Technik IRIM (Ionospheric Residuals Integrity Monitoring). Aufgrund der Generalisierung dieser Grafiken können diese ionosphärischen Modellrestfehler aber nur als Indiz dienen – es muss also mit größeren Ungenauigkeiten bei der RTK-Positionierung gerechnet werden.

In Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 erkennt man, dass insbesondere am 11. September, aber auch am 12. September 2005 stärkere ionosphärische Störungen auftraten. Der 13. September 2005 war hingegen ein Tag mit sehr geringer ionosphärischer Aktivität.

Die geometrischen Modellrestfehler, sie umfassen die Restfehler der Orbits, Troposphäre und Uhren, bewegen sich dagegen im Vergleich zu den ionosphärischen Restfehlern i.d.R. eher im Millimeterbereich. Diese Fehleranteile – wie sie in Abbildung 5-6 dargestellt sind – sind im Allgemeinen für die Echtzeitpositionierung weniger kritisch.

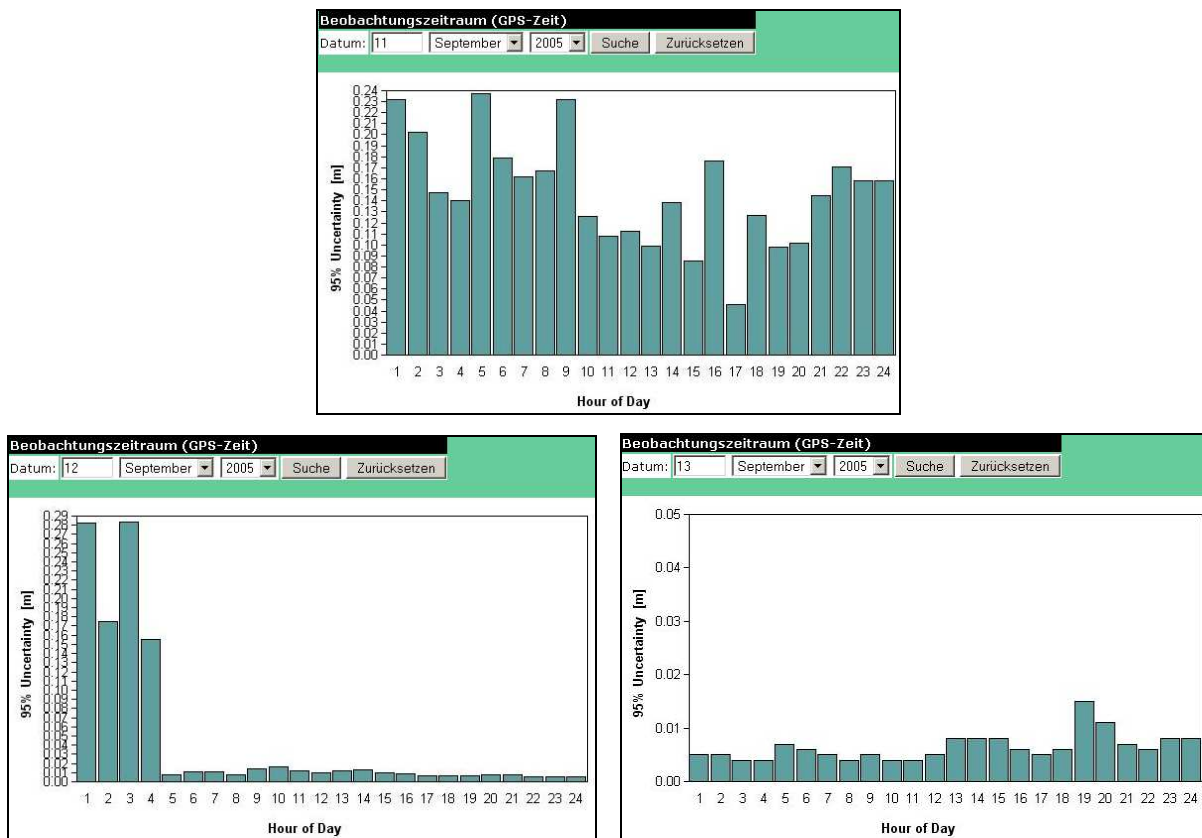


Abbildung 5-5: Ionosphärischer Modellrestfehler für das thüringische SAPOS[®]-Netz im Zeitraum 11.-13. September 2005 (Quelle: <http://www.sapos.thueringen.de>)

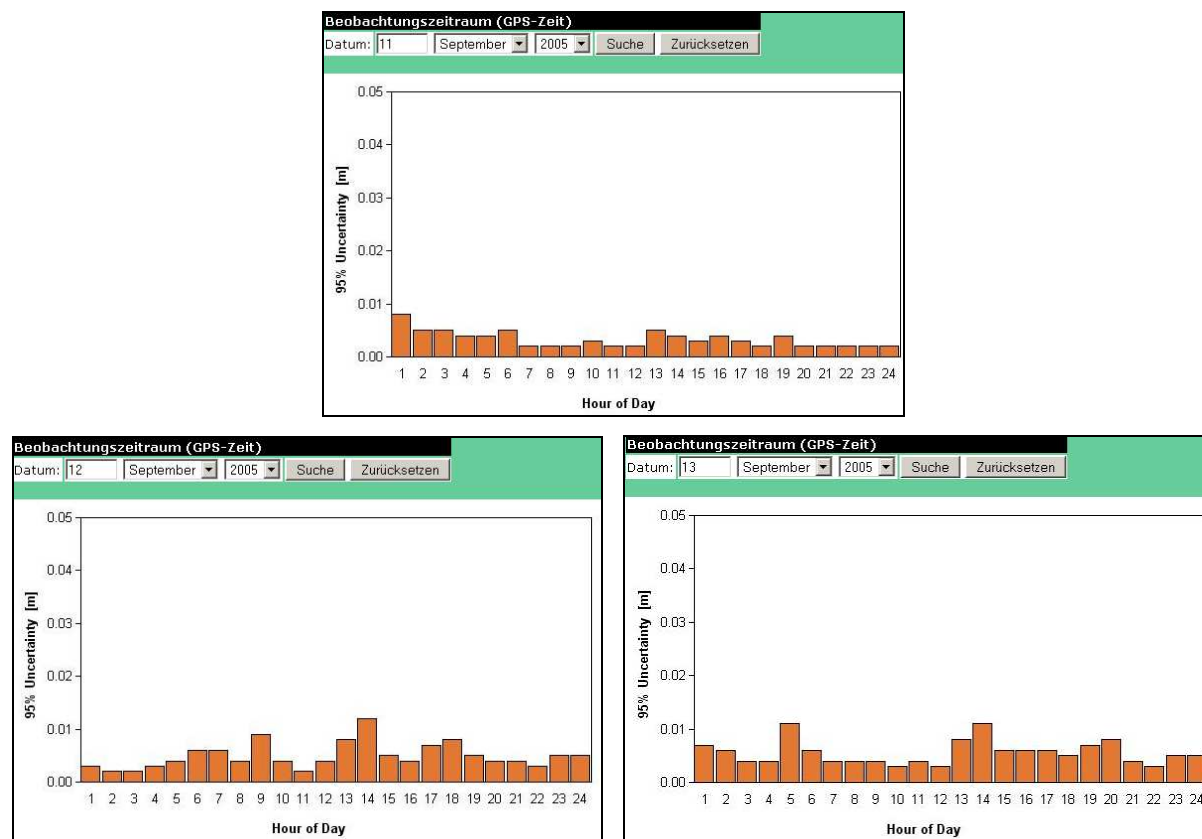


Abbildung 5-6: Geometrischer Modellrestfehler für das thüringische SAPOS[®]-Netz im Zeitraum 11.-13. September 2005 (Quelle: <http://www.sapos.thueringen.de>)

Im Folgenden werden nun ausgewählte Ergebnisse für die schnelle präzise Positionierung mit SEMIKA vorgestellt. Für umfangreichere Ergebnisse sei auf Anhang E verwiesen. Es wurden reale RINEX-Beobachtungsdaten über zwei Stunden des ionosphärisch aktiveren 11. September 2005 verwendet. Zur Fixierung der Mehrdeutigkeiten wurde das in Kapitel 5.2.4 beschriebene Kombinationsverfahren verwendet; zur Erinnerung: es wird zunächst mit Hilfe des LAMBDA-Suchverfahrens die Mehrdeutigkeiten einer ersten Linearkombination fixiert (in den folgenden Grafiken mit „1. Komb.“ abgekürzt), darauf folgend wird versucht, eine geometriereduzierte Linearkombination zu fixieren (in den folgenden Grafiken mit „2. Komb.“ abgekürzt).

Als à priori Korrekturmodell wurde für die Ionosphäre das Klobuchar-Modell, für die Troposphäre numerische Wettermodelle (NWM) verwendet. Die verbleibenden atmosphärischen Restfehler wurden mit Hilfe des Programms NEREUS mittels zweier Flächenkorrekturparameter (breiten- und längenabhängig) modelliert.

Für die PDGPS-Lösung und somit zur Mehrdeutigkeitsfixierung wurden jeweils 20 s, 40 s bzw. 60 s Intervalle verwendet. Um den Vorteil von Flächenkorrekturparametern zu verdeutlichen, wurden zusätzlich für 60 s Intervalle PDGPS-Lösung ohne Verwendung von Flächenkorrekturparametern berechnet.

Des Weiteren wurde eine Elevationsmaske von 15° gewählt.

Um untersuchen zu können, inwieweit der Abstand der einzelnen Referenzstationen bei der Ableitung der Flächenkorrekturparameter mit NEREUS bzw. der Abstand des Rovers zur nächstgelegenen Referenzstationen eine Rolle spielt, wurden Daten in den drei in Kapitel 4.6.2 vorgestellten Dreiecksmaschen prozessiert; diese Netze werden entsprechend ihren Stationsabständen im Folgenden mit „klein“ (Netz 1 – Basislinienlänge von 19 km bei Positionierung), „mittel“ (Netz 2 – Basislinienlänge von 32 km bei Positionierung) und „groß“ (Netz 3 – Basislinienlänge von 58 km bei Positionierung) bezeichnet.

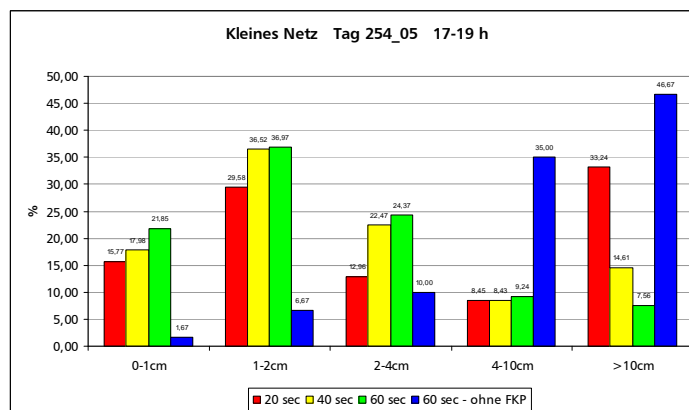


Abbildung 5-7: 3D-Positionsfehler für kleines Teilnetz, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

Für das kleine Teilnetz ist in Abbildung 5-7 der 3D-Positionsfehler dargestellt. Dabei wurde zwischen fünf Genauigkeitsklassen unterschieden (<1 cm, 1-2 cm, 2-4 cm, 4-10 cm und >10 cm). Um die Größe des Positionsfehlers besser beurteilen zu können, wurde in Abbildung 5-8 eine dazugehörige Statistik der Mehrdeutigkeitsfixierung erstellt, d.h. wie viele der Mehrdeutigkeiten wurden korrekt bzw. falsch fixiert und wie viele konnten nicht fixiert werden (dabei wurde zwischen der ersten und zweiten Linearkombination unterschieden). Betrachtet man die Ergebnisse, so ist festzustellen, dass erhöhte 3D-Positionsfehler i.d.R. auf nicht fixierte Mehrdeutigkeiten zurückzuführen sind. In der Praxis würde man in diesen Fällen einfach mit längeren Konvergenzzeiten als 1 min

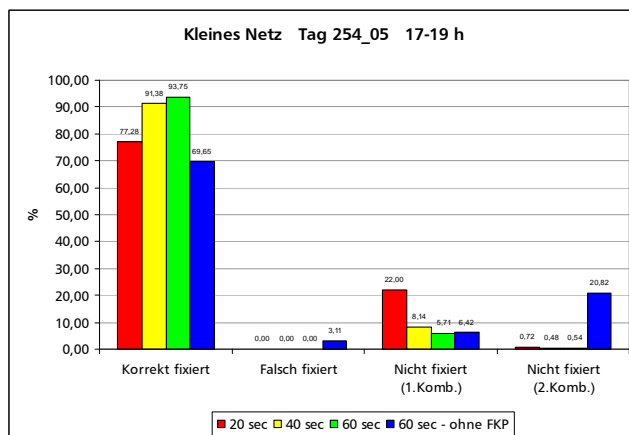


Abbildung 5-8: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linear-kombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar) für kleines Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

arbeiten müssen, um eine fixierte PDGPS-Lösung – und damit wahrscheinlich eine bessere Positionsgenauigkeit – zu erhalten. Daher ist der Blick auf die Kategorie „falsch fixiert“ umso interessanter: werden Flächenkorrekturparameter zur Positionierung mit herangezogen, so kommt es in diesem kleinen Netz mit einer Basislänge von 19 km zu keinen Fehlfixierungen, dahingegen werden 3,1% der Mehrdeutigkeiten bei einer klassischen Basislinienauswertung über eine Zeitdauer von immerhin 60 s fehlfixiert.

Ein ähnliches Ergebnis erhält man bei Verwendung von Beobachtungsdaten im mittleren Netz, bei dem die Referenzstationen zur Ableitung der Flächenkorrekturparameter einen Abstand von ca. 80 km haben, die Basislinienlänge zur Roverpositionierung beträgt 32 km. Allerdings beträgt die Fehlfixierungsquote der PDGPS-Lösungen ohne Zuhilfenahme von Flächenkorrekturparametern schon 8,2%, s. Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10.

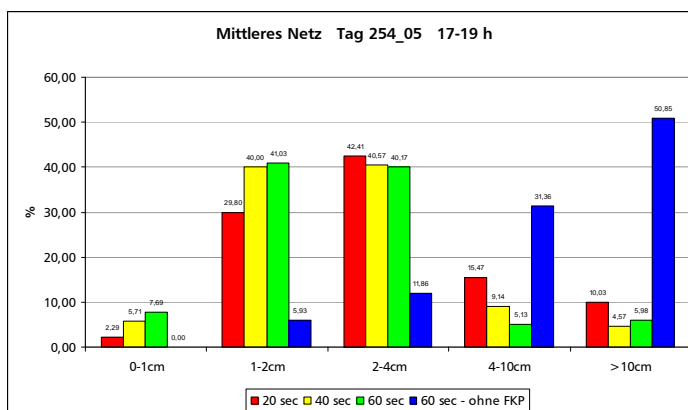


Abbildung 5-9: 3D-Positionsfehler für mittleres Teilnetz, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

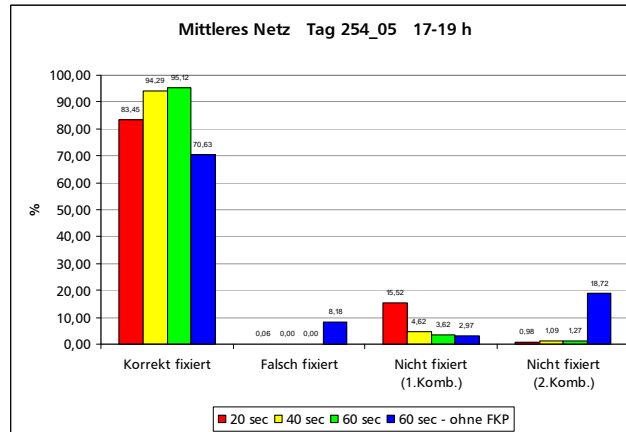


Abbildung 5-10: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linear-kombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar) für mittleres Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

Bei einer Roverpositionierung über eine Basislänge von 58 km und Referenzstationsabständen für die Flächenkorrekturparameterableitung von über 100 km kommt es jedoch auch bei Verwendung von Flächenkorrekturparametern zu Fehlfixierungen, aber nur im Bereich kleiner als 1%, s. Abbildung 5-11 und Abbildung 5-12.

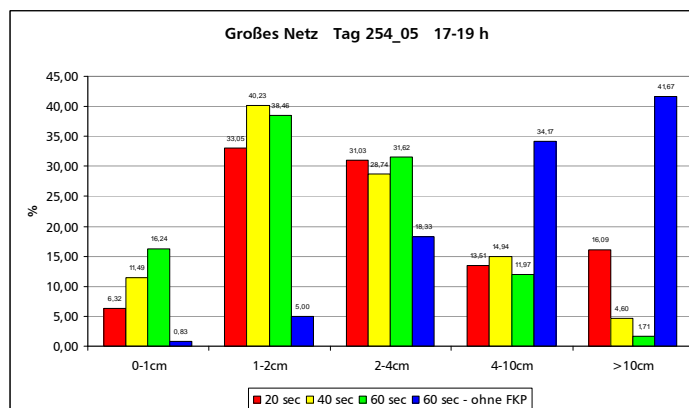


Abbildung 5-11: 3D-Positionsfehler für großes Teilnetz, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

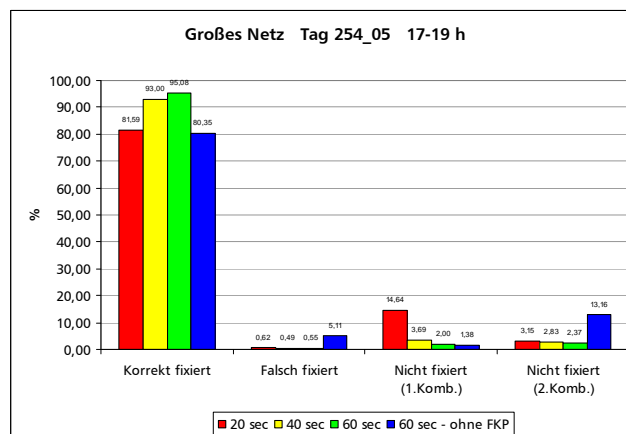


Abbildung 5-12: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linear-kombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar) für großes Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

Beim Vergleich der Ergebnisse in den unterschiedlichen Teilnetzen ist außerdem noch zu beachten, dass entsprechend auch Daten unterschiedlicher Stationen verwendet wurden, so dass auch stationsspezifische Störeinflüsse wie z.B. Mehrwege-Fehler eine Rolle spielen können.

Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen zum einen die Überlegenheit von Flächenkorrekturparametern (oder äquivalent von virtuellen Referenzstationen, bei denen entsprechende atmosphärische Korrekturen angebracht werden), also der Nutzung von aktiven Referenzstationsnetzwerken, gegenüber einer einfachen Basislinienauswertung unter Verwendung von Standard-Korrekturmodellen für die Atmosphäre. Zum anderen konnte gezeigt werden, dass mit der eigenen Software SEMIKA vergleichbare Ergebnisse in der schnellen Positionierung erzielt werden können wie mit kommerzieller Software.

5.4.3 Ergebnisse aus dem SAPOS®-Teilnetz Bayern

Für das bayerische Teilnetz wurden nicht so viele Untersuchungen durchgeführt wie für das thüringische Netz, so wurden nur Beobachtungsdaten aus dem nördlichen Teilnetz (s. Kapitel 4.6.1) herangezogen. Ansonsten war die Konfiguration bezüglich der Wahl der à priori Korrekturmodelle, der Modellierung der Flächenkorrekturparameter sowie der Elevationsmaske identisch zu der im thüringischen Teilnetz.

Es wurde aber hier kein Vergleich mit Ergebnissen, die aus einer Prozessierung ohne Zuhilfenahme von Flächenkorrekturparametern entstanden sind, durchgeführt. Andererseits wurde aber versucht, mit lediglich 10 s Datensätzen eine Mehrdeutigkeitsfixierung durchzuführen. Wie man aber in Abbildung 5-14 erkennen kann, können nur noch gut 80% der 10 s Intervalle erfolgreich fixiert werden. Untersucht man einen anderen Zeitraum, so kann dieser Wert auch noch deutlich geringer ausfallen, wie man an den weiteren Ergebnissen, die in Anhang E zusammengestellt wurden, sehen kann. Des Weiteren kann man in Abbildung 5-13 die mit ansteigender Zeitintervallgröße zunehmende Genauigkeit der Position erkennen.

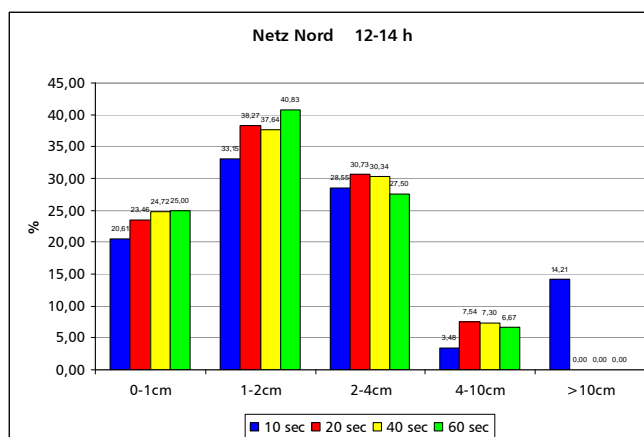


Abbildung 5-13: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

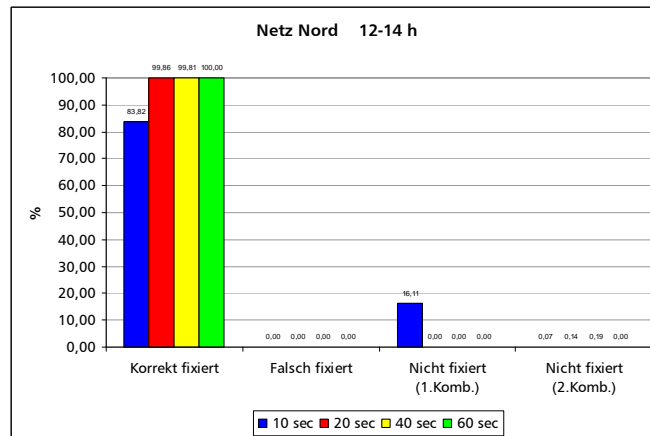


Abbildung 5-14: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linearkombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar); 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

6 Erzeugung synthetischer Beobachtungsdaten

Um den Einfluss von zusätzlich zur Verfügung stehenden Signalen, die in Zukunft von einem modernisierten GPS bzw. GALILEO bereit gestellt werden, abschätzen zu können, müssen synthetische Beobachtungsdaten generiert werden.

Die einzelnen Schritte, die zur Berechnung dieser Daten notwendig sind, werden in den folgenden Unterkapiteln so detailliert wie nötig dargestellt. Dabei wird vor allem auf die für diese Arbeit besonderen Aspekte näher eingegangen. Generell wird bei der Simulation von $L1$ -/ $L2$ -Daten (GPS) das bisherige RINEX 2.10 Format verwendet, für Daten für das modernisierte GPS oder GALILEO wird das RINEX 3.0 Format verwendet.

6.1 Funktionelle Beschreibung

Der Ablauf der Berechnung von synthetischen Daten ist vom Prinzip her eine Umkehrung der Prozessierung von Daten, wie sie in Kapitel 4.3 beschrieben wurde. Ein detailliertes Ablaufdiagramm ist in Abbildung 6-2 dargestellt, das im Folgenden erläutert wird.

Nach dem Schreiben der Header-Informationen werden für jeden Zeitpunkt t – der Nutzer gibt einen Zeitraum und ein konstantes ganzzahliges Epochenintervall vor – die Beobachtungsdaten generiert. Nach Anbringen der Erdzeitenkorrektur, s. Kapitel 4.3.1, muss der Zeitpunkt der Signalabstrahlung am Satelliten berechnet werden. Da diese aber nur iterativ berechnet werden kann, wird von einem Startwert von $t_{SAT} = t - 0,067 \text{ sec}$ ausgegangen; der Empfängeruhrfehler δt_{EMP} , wie in Abbildung 6-1 dargestellt, wird zu null gesetzt (da bei der Positionierung mit doppelten Differenzen gearbeitet wird, ist die Empfängeruhrproblematik sowieso kein Thema), d.h. t und t' sind hier identisch.

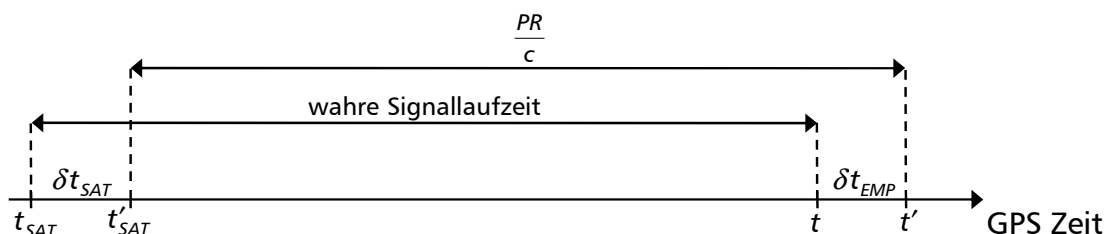


Abbildung 6-1: Abstrahlzeitpunkt t_{SAT} und Beobachtungsepoche t

Damit können die Positionen der Satelliten zum Abstrahlzeitpunkt berechnet werden; nähere Informationen zu den verwendeten Orbitdaten finden sich in Kapitel 6.4.

Da die in den SP3-Dateien enthaltenen Koordinaten der Satelliten sich immer auf das Massenzentrum und nicht auf das Phasenzentrum beziehen (im Gegensatz zu Broadcast-Orbits, die sich bereits auf das Phasenzentrum beziehen), müssen die entsprechenden Unterschiede („off-sets“) Δx , Δy und Δz , die für die einzelnen Blöcke von GPS-Satelliten gegeben sind (z.B. KING [2000]), angebracht werden. Nach FLIEGEL ET AL. [1992] berechnet sich der Verschiebungsvektor vom Massenzentrum zum Phasenzentrum $\Delta \vec{X}_{EXZ}$ im geozentrischen Koordinatensystem nach

$$\Delta \vec{X}_{EXZ} = \Delta x \cdot \vec{e}_x + \Delta y \cdot \vec{e}_y + \Delta z \cdot \vec{e}_z \quad (6-1)$$

mit

$$\vec{e}_z = -\frac{\vec{X}_{SAT}}{|\vec{X}_{SAT}|}, \vec{e}_y = \frac{\vec{e}_z \times \Delta\vec{X}_{SAT}^{SUN}}{|\vec{e}_z \times \Delta\vec{X}_{SAT}^{SUN}|} \quad (\Delta\vec{X}_{SAT}^{SUN} = \vec{X}_{SUN} - \vec{X}_{SAT}) \quad \text{und} \quad \vec{e}_x = \vec{e}_y \times \vec{e}_z. \quad (6-2)$$

Somit zeigt die z-Achse in Richtung Erde, die y-Achse fällt mit der Achse der Sonnenpanels zusammen und die x-Achse resultiert aus dem entsprechenden Kreuzprodukt.

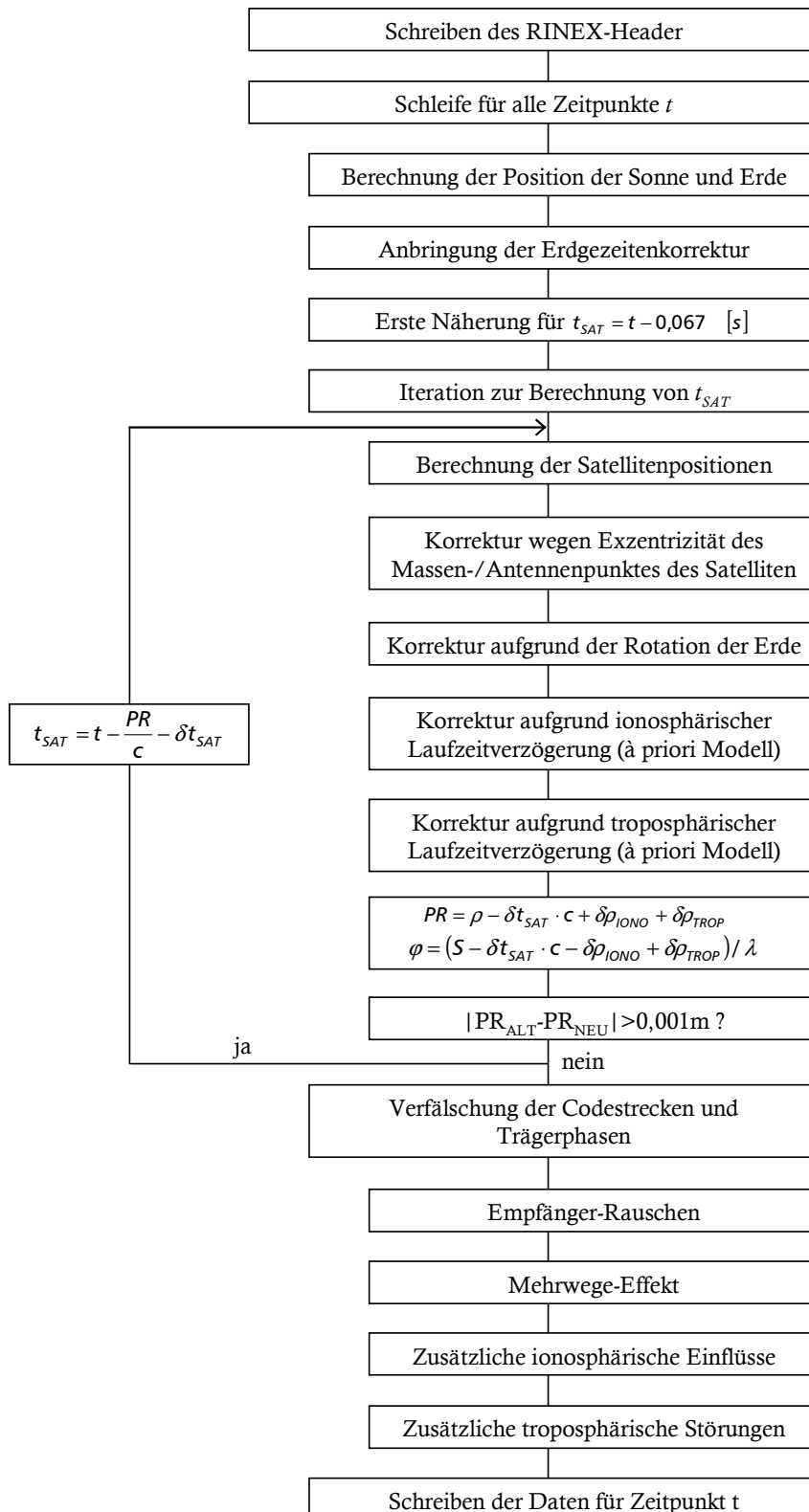


Abbildung 6-2: Ablaufdiagramm für Berechnung synthetischer Beobachtungsdaten

Es werden Satellitenkoordinaten zur Epoche der Signalausendung in einem erdfesten Koordinatensystem berechnet. Da die Erde während der Signallaufzeit rotiert, müssen die ursprünglichen Satellitenkoordinaten X' , Y' und Z' um die z-Achse rotiert werden (Drehgeschwindigkeit der Erde $\omega_E = 7,2921151467 \cdot 10^{-5}$ rad/s):

$$\begin{aligned} X &= X' \cdot \cos \alpha + Y' \cdot \sin \alpha \\ Y &= Y' \cdot \cos \alpha - X' \cdot \sin \alpha \quad \text{mit } \alpha = (t - t_{SAT}) \cdot \omega_E \\ Z &= Z' \end{aligned} \quad (6-3)$$

Danach wird die Korrektur aufgrund der Laufzeitverzögerung in der Ionosphäre und der Troposphäre berechnet, dabei wird eines der in Kapitel 3.1.4 bzw. 3.2.1 vorgestellten à priori Korrekturmodelle verwendet.

Somit kann über

$$PR = S - \delta t_{SAT} \cdot c + \delta S_{IONO} + \delta S_{TROP} \quad (6-4)$$

$$\varphi = (S - \delta t_{SAT} \cdot c - \delta S_{IONO} + \delta S_{TROP}) / \lambda - N \quad (6-5)$$

die Kode- und Trägerphasenbeobachtung berechnet werden. Als Iterationskriterium für den Abstrahlzeitpunkt t_{SAT} gilt $|PR_{ALT} - PR_{NEU}| < 0,001m$. Der Wert der Mehrdeutigkeiten N der Trägerphasenbeobachtungen kann beliebig gewählt werden, wird aber im Rahmen dieser Arbeit immer auf den Wert null gesetzt.

Nach erfolgreicher Iteration werden den Beobachtungen noch verschiedene Fehler hinzugefügt: das Empfänger-Rauschen (s. Kapitel 6.3), Fehler aufgrund von Mehrwege-Einflüssen (s. Kapitel 6.5), zusätzliche ionosphärische Laufzeitverzögerungen (s. Kapitel 6.6) sowie zusätzliche troposphärische Laufzeitverzögerungen (s. Kapitel 6.7).

Da bei den oben beschriebenen Rechenschritten auch immer wieder die Berechnung der Strecke zwischen einer Station A und einem Satelliten i sowie der Zenitwinkel und das Azimut von einer Station A zu einem Satelliten i benötigt wird, seien hier der Vollständigkeit halber die entsprechenden Formeln aufgeführt:

$$S_A^i = |\vec{X}^i - \vec{X}_A| = \sqrt{\Delta X_A^i{}^2 + \Delta Y_A^i{}^2 + \Delta Z_A^i{}^2} \quad (6-6)$$

$$\cos z_A^i = \frac{\cos \varphi_A \cdot \cos \lambda_A \cdot \Delta X_A^i + \cos \varphi_A \cdot \sin \lambda_A \cdot \Delta Y_A^i + \sin \varphi_A \cdot \Delta Z_A^i}{S_A^i} \quad (6-7)$$

$$\tan A_A^i = \frac{-\sin \lambda_A \cdot \Delta X_A^i + \cos \lambda_A \cdot \Delta Y_A^i}{-\sin \varphi_A \cdot \cos \lambda_A \cdot \Delta X_A^i - \sin \varphi_A \cdot \sin \lambda_A \cdot \Delta Y_A^i + \cos \varphi_A \cdot \Delta Z_A^i} \quad (6-8)$$

6.2 Signale und Frequenzen

Es können für alle in Tabelle 2-2 aufgeführten Frequenzen Beobachtungsdaten generiert werden, d.h. konkret für GPS auf den Frequenzen $L1$, $L2$ und $L5$ sowie für GALILEO auf den Frequenzen $E1$, $E5a$, $E5b$, $E5ab$ und $E6$. Für jede Frequenz wird aber maximal nur ein Signal generiert, d.h. für GALILEO $E1$ wird angenommen, dass es sich um das Signal des Open Service handelt und bei GALILEO $E6$ um das des Commercial Service. Da die Beobachtungsdaten für eine schnelle präzise Positionierung verwendet werden sollen, wird des Weiteren angenommen, dass es sich bei den Daten um Messungen

im datenfreien Q-Kanal handelt.

6.3 Beobachtungsrauschen

Unter dem Begriff „Beobachtungsrauschen“ werden hier vereinfachend bzw. zusammenfassend alle Fehleranteile verstanden, die sich maßgeblich auf den GNSS-Empfänger exklusive externer Quellen (z.B. Mehrwege-Fehler) beziehen, wobei davon ausgegangen wird, dass es sich um näherungsweise normalverteilte und zeitlich weitgehend unkorrelierte Zufallsgrößen handelt. Dieses vereinfachende Vorgehen ist gerechtfertigt, da die Empfänger-bezogenen Fehleranteile im Vergleich zu den externen Effekten wie Mehrweg und Atmosphäre vergleichsweise kleine Größenordnungen aufweisen.

Bei der Simulation des Beobachtungsrauschens wird zwischen dem Kode- und dem Trägerphasenrauschen unterschieden. In beiden Fällen erfolgt die Modellierung elevationsabhängig (minimales Rauschen in Zenitrichtung) und für jeden Satelliten sowie jedes Signal (Frequenz) unterschiedlich (gemäß den Nutzervorgaben unter Verwendung typischer Werte für die einzelnen Signale wie sie in Tabelle 2-3 oder z.B. in AVILA-RODRIGUEZ ET AL. [2004] gegeben sind).

Für das Trägerphasenrauschen kann der Nutzer einen Minimalwert q_{min} für eine Elevation von 90° (Zenitrichtung) und einen Maximalwert q_{max} für eine Elevation von 10° festlegen, da hierbei davon ausgegangen wird, dass bei einer späteren Auswertung der synthetischen Beobachtungsdaten eine Elevationsmaske von minimal 10° verwendet wird. Damit erhält man die folgende Funktion für das Trägerphasenrauschen, die anschließend noch mit einer Zufallsvariablen (wird für jeden Satelliten, jedes Signal und jede Epoche neu bestimmt) multipliziert wird:

$$q = m \cdot E[\text{rad}] + n \quad \text{mit} \quad m = \frac{q_{min} - q_{max}}{\frac{4}{9}\pi} \quad \text{und} \quad n = \frac{9}{8}q_{max} - \frac{1}{8}q_{min} \quad (6-9)$$

Für q_{min} und q_{max} werden Erfahrungswerte angesetzt, i.d.R. 1 mm bzw. 3 mm.

Die Modellierung des Rauschens der Kodestrecken wird ebenfalls elevationsabhängig modelliert, hier sind aber Minimal- und Maximalwert fest vorgegeben. In Anlehnung an das von PRATT ET AL. [2006] abgeleitete Kode-Rauschen für GALILEO *E1* (Abbildung 6-3) wurde eine Exponentialfunktion in Abhängigkeit von der Elevation abgeleitet. Hierfür wurden den Werten für das Träger-zu-Rausch-Verhältnis C/N_0 bei einer Empfängerbandbreite von 24 MHz entsprechende, in Abbildung 6-3 aufgeführte Elevationen zugeordnet.

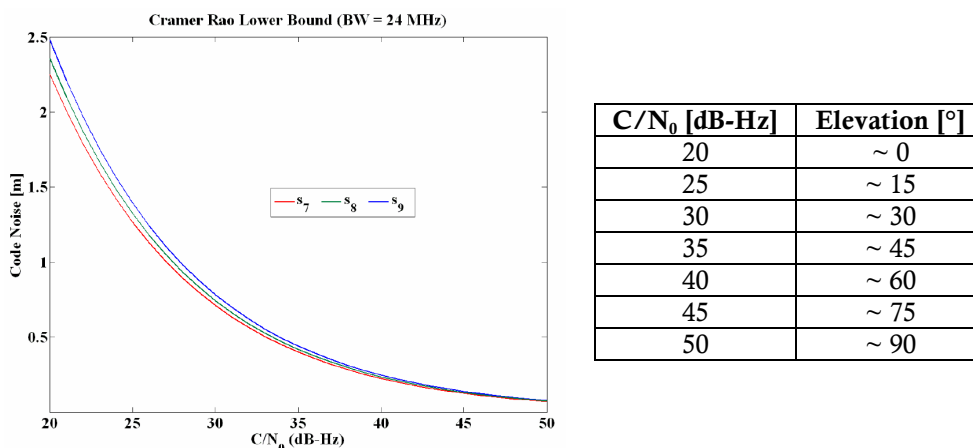


Abbildung 6-3: Ableitung des Kode-Beobachtungsrauschens nach PRATT ET AL. [2006]

Damit ergibt sich die folgende Funktion für das Kodestrecken-Rauschen beispielsweise für GALILEO E1:

$$q = e^{-2,21 \cdot E[\text{rad}] + 0,72} + 0,14 \quad (6-10)$$

6.4 Orbits

Für die Erzeugung von synthetischen Beobachtungsdaten wird von NEREUS für die Orbitdaten eine sp3-Datei (s. Kapitel 4.3.1) benötigt. Für GPS-Orbits wird dafür auf Broadcast-Ephemeriden²⁶ zurückgegriffen, mit Hilfe derer Satellitenkoordinaten X , Y , Z berechnet werden; die einzelnen Berechnungsschritte sind in diesem Kapitel beschrieben.

Zur Ableitung von Satellitenkoordinaten für GALILEO wird auf einen Almanach zurückgegriffen, der auf den Angaben in PIRIZ ET AL. [2005] beruht. Danach sind 27 Satelliten in einer Walker 27/3/1 Konstellation geplant, wobei die große Halbachse der Satellitenbahnen a 29600,318 km (Wurzel der großen Halbachse $\sqrt{a} = 5440,617 \sqrt{m}$) und die Inklination i 56° beträgt. D.h. die 27 Satelliten sind auf drei Bahnebenen mit je 9 Satelliten verteilt, die Satelliten einer Bahnebene sind wiederum gegenüber der anderen Bahnebene um $13,33^\circ$ verschoben. Anders ausgedrückt beträgt die Rektaszension des aufsteigenden Knotens Ω (s. Abbildung 6-4) für die drei Bahnebenen 0° , 120° bzw. -120° . Der erste Satellit auf der ersten Satellitenbahn hat eine wahre Anomalie v von 0° , auf der zweiten Satellitenbahn eine wahre Anomalie v von $13,33^\circ$ und auf der dritten Satellitenbahn eine wahre Anomalie v von $26,66^\circ$. Da es sich bei den simulierten GALILEO Orbits noch um Kreisbahnen handelt, ist die wahre Anomalie v identisch mit der mittleren Anomalie M_0 .

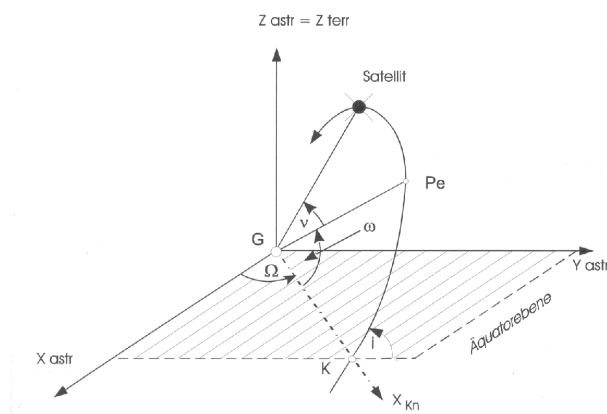


Abbildung 6-4: Räumliche Festlegung einer Satellitenbahn, Quelle: BAUER [2003]

Im Folgenden sind die wichtigsten Schritte zur Berechnung von Satellitenkoordinaten X , Y , Z aus Almanachdaten zusammengestellt, für mehr Details sei auf SEEBER [1989] oder BAUER [2003] verwiesen:

- Almanachdaten sind für den Referenzzeitpunkt t_0 gegeben.
- Zum Zeitpunkt t sollen Satellitenkoordinaten berechnet werden.
- Die seit der Referenzepoche verstrichene Zeit beträgt $t_k = t - t_0$.

²⁶ Broadcast Ephemeriden können unter <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily/YYYY/brdc/brdcddd0.yyn.Z> herunter geladen werden; dabei bezeichnet YYYY das vierstellige Jahr, ddd den dreistelligen Tag des Jahres sowie yy das zweistellige Jahr.

- Die mittlere Winkelgeschwindigkeit n ist $n = \sqrt{\frac{\mu}{A^3}}$ mit der geozentrischen Gravitationskonstanten $\mu = 398600,5 \text{ km}^3 \cdot \text{s}^{-2}$.
- Die mittlere Anomalie zum Zeitpunkt t_k ist $M_k = M_0 + n \cdot t_k$.
- Daraus lässt sich iterativ (bei simulierten GALILEO-Orbits nicht notwendig, da die numerische Exzentrizität e null ist) die exzentrische Anomalie E_k berechnen: $E_k = M_k + e \cdot \sin E_k$.
- Die wahre Anomalie v berechnet sich aus $\tan v_k = \frac{\sqrt{1-e^2} \cdot \sin E_k}{\cos E_k - e}$.
- Das Argument der Breite ist $\Phi_k = v_k - \omega$ mit ω als Argument des Perigäums.
- Mit dem korrigierten Radius $r_k = A \cdot (1 - e \cdot \cos E_k)$ und der korrigierten Länge des aufsteigenden Knotens $\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \omega_E) \cdot t_k - \omega_E \cdot t_{0e}$ lassen sich die Koordinaten in der Bahnebene berechnen: $X'_k = r_k \cdot \cos \Phi_k$ $Y'_k = r_k \cdot \sin \Phi_k$.
- Letztlich erhält man die geozentrischen, erdfesten Satellitenkoordinaten:

$$\begin{aligned} X_k &= X'_k \cdot \cos \Omega_k - Y'_k \cdot \sin \Omega_k \cdot \cos i \\ Y_k &= X'_k \cdot \sin \Omega_k + Y'_k \cdot \cos \Omega_k \cdot \cos i \\ Z_k &= Y'_k \cdot \sin i \end{aligned}$$

Da die Satellitenkoordinaten und -uhrfehler für alle 15 Minuten gegeben sind, muss zwischen diesen Zeitpunkten noch interpoliert werden. Dies geschieht über ein Polynom 18. Grades, mehr Details dazu sind in PRESS ET AL. [1992] zu finden.

6.5 Mehrwege-Fehler

Mehrwege-Fehler stellen eine wesentliche Komplikation bei der schnellen Fixierung der Mehrdeutigkeiten dar, da eine gemeinsame Verarbeitung von Pseudo-Strecken und Trägerphasen zur schnellen Lösung der Mehrdeutigkeitsterme notwendig ist, die Streckenmessungen von Mehrwege-Fehlern jedoch in hohem Maße betroffen sind. Aus diesem Grund muss eine möglichst realistische Modellierung dieser Fehlergröße erfolgen, die sich auf eine repräsentative Umgebung eines typischen SAPOS[®]-Nutzers bezieht.

Der hier verfolgte Modellansatz kann als „halb-empirisch“ bezeichnet werden, da er sowohl empirisch ermittelte Anteile (Frequenzinhalt) als auch theoretisch modellierte Anteile (Amplituden) enthält. In einem ersten Schritt wird aus der Code-minus-Carrier Analyse an einer Station der für das Mehrweg-Signal typische Frequenzinhalt analysiert. Als Ort wurde ein Pfeiler vor der Messkuppel (Institut für Erdmessung und Navigation, Gebäude 62) genutzt. Die Örtlichkeit kann als „typische Umgebung“ angesehen werden, wie sie in ähnlicher Weise auch viele SAPOS[®]-Nutzer vorfinden werden. Das Mehrweg-Signal wird dann über eine Fourier-Analyse in seine Einzelfrequenzen zerlegt. Um die bedeutsamen Mehrweg-Anteile vom Rauschen zu trennen, werden aus dem Spektrum die 72 signifikanten Wellenzüge – siehe Abbildung 6-5 – mit den Kreisfrequenzen $\omega_i = 2\pi \cdot f_i$ und den Amplituden A_i ausgewählt. Die Amplituden werden so skaliert, dass das Mehrweg-Signal $\sum_i A_i \cdot \cos(\omega_i \cdot t + \varphi)$ auf den Bereich [-1;1] normiert wird, da in diesem Schritt

lediglich der charakteristische Frequenzinhalt ermittelt werden soll. Die Phasenverschiebung φ wird über einen Zufallsgenerator individuell für jeden Satelliten/jedes Signal gewählt, so dass keine Auslöschung der Mehrwege-Fehler bei der doppelten Differenzbildung möglich ist.

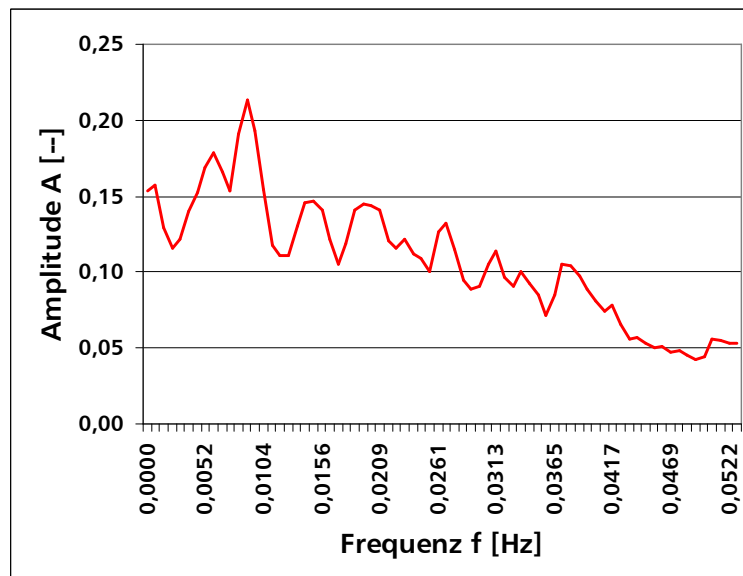


Abbildung 6-5: Koeffizienten aus der Fourieranalyse

Danach erfolgt eine Multiplikation mit den in Tabelle 6-1 aufgeführten Maximalwerten (Werte für GALILEO *E5a*, *E5b* und *E5ab* sind identisch, es wurde nicht die in der Zwischenzeit beschlossene MBOC-Modulation für GALILEO *E1* berücksichtigt). Abschließend wird der Mehrwege-Fehler elevationsabhängig gewichtet, d.h. es wird eine Mappingfunktion analog zu der des Phasenrauschens verwendet (Formel (6-9)), wobei der Minimal- und Maximalwert in Prozent vom Nutzer vorgegeben wird.

		Code [m]	Carrier [m]	Modulation
GPS	<i>L1/L2</i>	$\pm 6,935$	$\pm 0,016$	BPSK(1)
	<i>L5</i>	$\pm 4,513$	$\pm 0,021$	BPSK(10)
	<i>E1</i>	$\pm 6,935$	$\pm 0,016$	BOC(1;1)
GALILEO	<i>E5a</i>	$\pm 1,620$	$\pm 0,021$	AltBOC(15;10)
	<i>E6</i>	$\pm 4,000$	$\pm 0,017$	BPSK(5)

Tabelle 6-1: Maximalwerte für Code- und Carrier-Mehrwege-Fehler, Quelle: AVILA-RODRIGUEZ ET AL. [2004]

6.6 Ionosphäre

Da im 1-Schicht-Modell der Ionosphäre approximativ von einer Elektronenkonzentration innerhalb einer kleinen Schicht in einer bestimmten Höhe ausgegangen wird, bezieht sich die ionosphärische Laufzeitverzögerung nicht auf den Elektronengehalt im Zenit über einer Station *A*, sondern auf den ionosphärischen Durchstoßpunkt *IP* bzw. auf den lotrecht darunter liegenden ionosphärischen Subpunkt. Deshalb muss mit den Koordinaten der ionosphärischen Subpunkte gerechnet werden.

Zur Modellierung der Ionosphäre wird eine Ionosphärenschicht in der Höhe h_i , die die mittlere Höhe der Ionosphäre – ca. 300-500 km – repräsentiert, herangezogen. Der ionosphärische Durchstoßpunkt *IP* ist definiert als der Schnittpunkt zwischen der Verbindungslinie Station *A* – Satellit *i* und der mittleren Ionosphärenschicht.

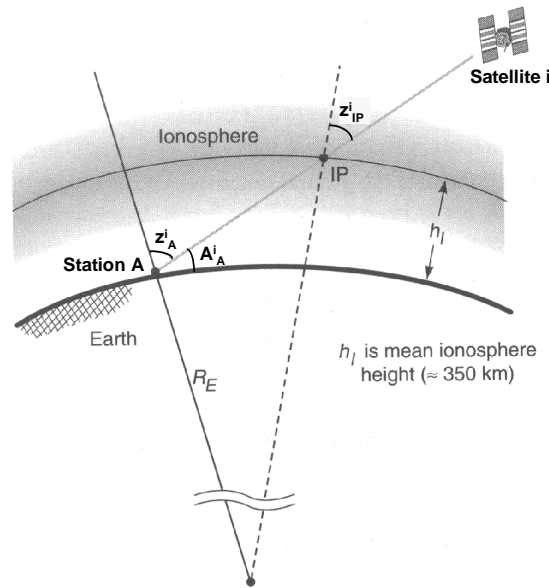


Abbildung 6-6: Darstellung des ionosphärischen Subpunktes, Quelle: MISRA UND ENGE [2001]

Mit Hilfe des Zenitwinkels z_A^i von Station A zum Satelliten i (Formel (6-7)) lässt sich der Zenitwinkel z_{IP}^i im Durchstoßpunkt IP zum Satelliten i berechnen:

$$\sin z_{IP}^i = \frac{R_E + h_A}{R_E + h_{ION}} \cdot \sin z_A^i \quad (6-11)$$

Mit den beiden Zenitwinkeln z_A^i und z_{IP}^i sowie dem Azimut A_{IP}^i (Formel (6-8)) an der Station A zum Satelliten i lassen sich nach LEINEN [1997] die Koordinaten φ_{IP} und λ_{IP} des ionosphärischen Subpunktes IP berechnen:

$$\sin \varphi_{IP}^i = \sin \varphi_A \cdot \cos(z_A^i - z_{IP}^i) + \cos \varphi_A \cdot \sin(z_A^i - z_{IP}^i) \cdot \cos A_A^i \quad (6-12)$$

$$\lambda_{IP}^i = \lambda_A + \arcsin\left(\frac{\sin(z_A^i - z_{IP}^i) \cdot \sin A_A^i}{\cos \varphi_{IP}^i}\right) \quad (6-13)$$

Für die Simulation einer ionosphärischen Störung (travelling ionospheric disturbances TID, s. Kapitel 3.1.2) wird ausgehend von den theoretischen Erörterungen in Kapitel 3.1 eine sich in Nord-Süd-Richtung wandernde Sinuswelle angenommen, s. Abbildung 6-7.

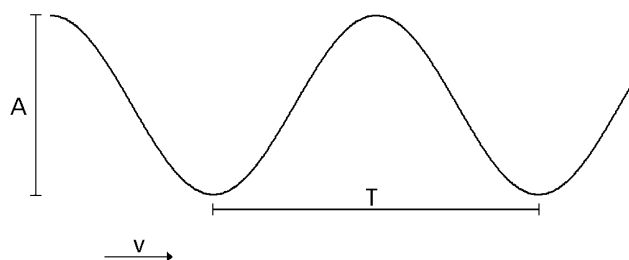


Abbildung 6-7: Simulation einer ionosphärischen Störung

Es wird die erste Referenzstation festgehalten, d.h. die Welle beginnt zum Startzeit-

punkt t der Simulation an der ersten Referenzstation $1.REF$. Für die Referenzstation sowie für die zu simulierende Station SIM wird jeweils für jeden Satelliten die Breite des Ionosphären-Subpunktes berechnet, so dass man den Breitenunterschied $\Delta\varphi$ erhält:

$$\Delta\varphi^i = \varphi_{IP_{1.REF}}^i - \varphi_{IP_{SIM}}^i \quad (6-14)$$

Der Nutzer kann die Amplitude A der Sinusfunktion, die Geschwindigkeit v sowie die Periode T frei wählen. Somit erhält man für die Laufzeitverzögerung der ionosphärischen Störung in Zenitrichtung an der zu simulierenden Station SIM :

$$IONO = A \cdot \cos(\omega \cdot t^*) \quad \text{mit} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}, \quad t^* = t + \Delta t, \quad \Delta t = \frac{\Delta\varphi}{v} \quad (6-15)$$

mit $\Delta\varphi$ in [m] und v in [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]. Anschließend wird $IONO$ mit Hilfe der Klobuchar Mappingfunktion (Formel (3-8)) in Richtung des Satelliten i gemappt.

Um zusätzlich eine starke Ab-/Zunahme der ionosphärischen Laufzeitverzögerung innerhalb kurzer Zeit simulieren zu können, kann auf Wunsch des Nutzers der o.a. sinusförmigen Störung ein linearer Trend hinzuaddiert werden. Für diesen linearen Trend kann der Nutzer ebenfalls eine Amplitude und eine Periodendauer frei wählen.

6.7 Troposphäre

Zur Simulation einer troposphärischen Störung wird eine sich in West-Ost-Richtung bewegende Sägezahnfunktion angenommen, s. Abbildung 6-8. Diese Funktion soll durchziehende Wetterfronten simulieren, dabei wird die in Mitteleuropa vorherrschende Windrichtung West verwendet.

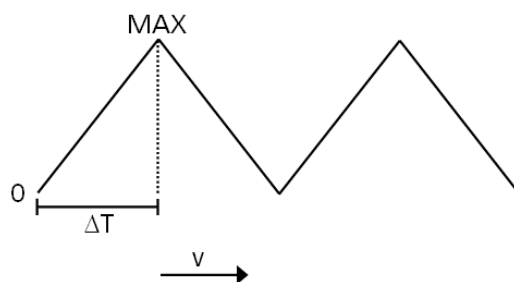


Abbildung 6-8: Simulation einer troposphärischen Störung

Zu Beginn der Datensimulation wird der troposphärische Restfehler auf der ersten Referenzstation zu null gesetzt, dementsprechend muss er auf den anderen Stationen zeitversetzt sein.

Der Nutzer kann den maximalen troposphärischen Restfehler in Zenitrichtung MAX , das Zeitintervall ΔT zwischen minimalem und maximalem Fehler sowie die Windgeschwindigkeit v frei wählen. D.h. es muss zunächst für die jeweilige Station der entsprechende Zeitpunkt berechnet werden (t muss zwischen 0 und $2\cdot\Delta t$ liegen) und anschließend die folgende Funktion angewendet werden, womit man die troposphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung $TROP$ aufgrund der troposphärischen Störung erhält:

$$\begin{cases} TROP = m_1 \cdot t + n_1 & \text{mit } m_1 = \frac{MAX}{\Delta T} & n_1 = 0 & \text{für } t \leq \Delta T \\ TROP = m_2 \cdot t + n_2 & \text{mit } m_2 = -\frac{MAX}{\Delta T} & n_2 = 2 \cdot MAX & \text{für } t > \Delta T \end{cases} \quad (6-16)$$

Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 6-9 die drei möglichen Szenarien – die zu simulierende Station liegt östlich der 1. Referenzstation, auf derselben Länge der 1. Referenzstation oder westlich der 1. Referenzstation – zusammengestellt.

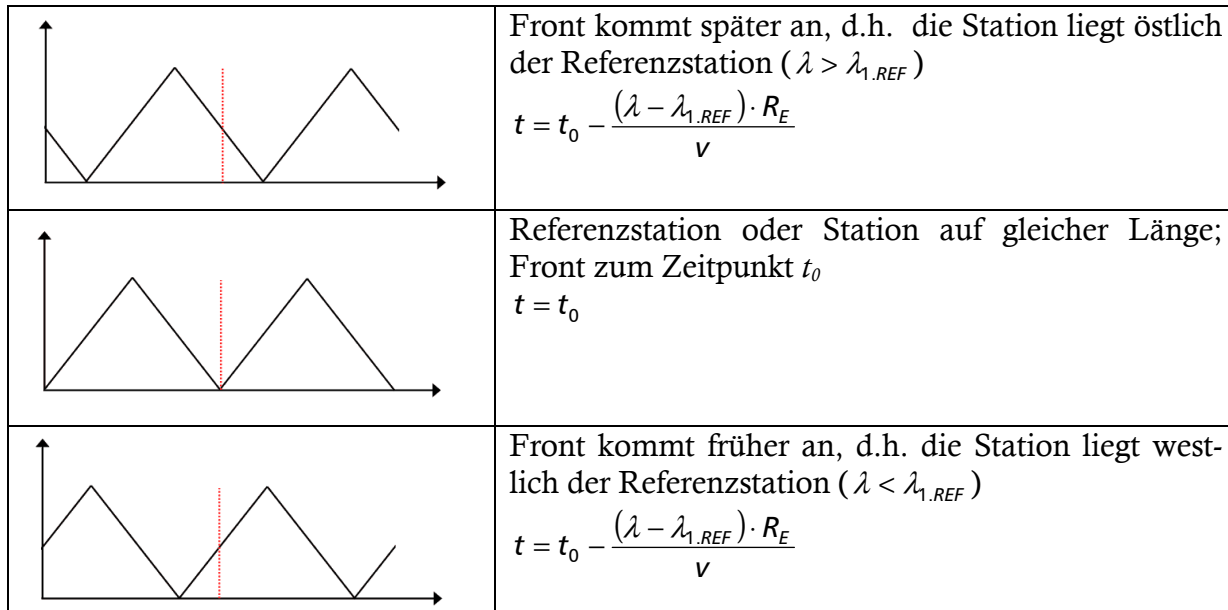


Abbildung 6-9: Troposphärische Störung auf Stationen unterschiedlicher Länge

Anschließend wird $TROP$ noch in Richtung des Satelliten umgerechnet. Hierzu wird eine einfache Mappingfunktion – von Black & Eisner – verwendet, die lediglich von der Elevation abhängt (KLOBUCHAR [1996]):

$$m(E) = \frac{1,001}{\sqrt{0,001^2 + 0,002 + \sin^2 E}} \quad (6-17)$$

Um eine Aussage treffen zu können, wie stark troposphärische Störungen in Mitteleuropa sein können, wurden beispielhaft die meteorologischen Daten der IGS-Station Wettzell ausgewertet. Hierzu wurden über einen Zeitraum von fünf Jahren (2001-2005) die stündlichen Unterschiede in Luftdruck, Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit betrachtet. In Tabelle 6-2 sind die jeweils größten Unterschiede eines Jahres aufgelistet.

Datum	Δ Druck [hPa]	Δ Temperatur [°C]	Δ Rel. Feuchte [%]
7.7.2001	+2,2	-11,2	+44,2
10.7.2002	+3,2	-9,8	+47,5
18.8.2003	+1,4	-8,0	+46,7
8.7.2004	+3,7	-10,2	+55,9
15.7.2005	+1,1	-9,7	+47,3

Tabelle 6-2: Extreme Wetterereignisse innerhalb einer Stunde auf der IGS-Station Wettzell

Diese Maximalwerte wurden in troposphärische Laufzeitverzögerungen (ZHD und ZWD) umgerechnet. Für den trockenen Anteil wurde das Modell von Saastamoinen (Formel (3-18)) verwendet: Für den feuchten Anteil wurde das Modell von IFADIS [1986] verwendet, da dieses alle drei meteorologischen Parameter berücksichtigt:

$$ZWD = 0,554 \cdot 10^{-2} - 0,88 \cdot 10^{-4} \cdot (p - 1000) + 0,272 \cdot 10^{-4} \cdot e + 2,771 \cdot \frac{e}{T} \quad [m] \quad (6-18)$$

Dabei ist p der Luftdruck und e der partielle Wasserdampfdruck in [hPa] sowie T die Temperatur in [K]. Den partiellen Wasserdampfdruck berechnet man nach HANSEN [1998] aus der relativen Luftfeuchtigkeit RH und der Temperatur T über den Wasserdampfsättigungsdruck e_s :

$$e = e_s \cdot \frac{RH}{100} \quad \text{mit} \quad e_s = e_0 \cdot \exp\left(\frac{L}{R_e} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (6-19)$$

e_0 : Partielle Wasserdampfdruck bei einer Temperatur T_0 , $e_0=6,11$ hPa

L : Umwandlungswärme bei Verdampfung über einer glatten Wasseroberfläche, $L=2,5 \cdot 10^6$ J·kg⁻¹

R_e : Spezifische Gaskonstante für Wasserdampf, $R_e=461$ J·K⁻¹·kg⁻¹

T_0 : Temperatur des Taupunktes in [K], $T_0=273,15$ K

Nimmt man nun die Maximalwerte aus Tabelle 6-2 (Spalte „Differenz“ in Tabelle 6-3) und geht von entsprechend realistischen Normalwerten für Luftdruck, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit aus, so erhält man eine maximale Veränderung in der troposphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung von knapp 5 cm.

Parameter	Ausgangswert	Differenz	Resultat
Luftdruck [hPa]	936	+2	938
Temperatur [°C]	26	-9	17
Rel. Feuchte [%]	40	+50	90
Wasserdampfdruck [hPa]	13,7	+3,9	17,6
ZHD [mm]	2131	+5	2136
ZWD [mm]	138	+42	180
ZPD [mm]	2269	+47	2316

Tabelle 6-3: Berechnung der Differenz des ZPD auf Station Wettzell

Bei näherer Betrachtung der in Tabelle 6-2 aufgeführten Veränderungen – die meteorologischen Daten wurden in 15 min Intervallen aufgezeichnet – stellt man fest, dass die Zunahme des ZPD um 5 cm eher in einem Intervall kleiner als 60 min erfolgte. Zusammenfassend mit den Ergebnissen aus Kapitel 3.2.2 kann man sagen, dass bei einem Durchzug einer Wetterfront sich der ZPD in mittleren Breiten wie in Deutschland maximal 1-3 mal pro Jahr um ca. 4-5 cm in ungefähr 45-60 min verändern kann.

7 Zukunft der Positionsbestimmung

Für die Untersuchung mit simulierten GPS- und GALILEO-Beobachtungen wurde sich auf das thüringische SAPOS®-Netz sowie Stationen in den angrenzenden Bundesländern konzentriert. Dieses Netz weist besonders kleine Stationsabstände auf, so dass theoretisch eine schrittweise Ausdünnung des Netzes sehr gut möglich ist. Es zeigte sich jedoch im Laufe der Untersuchungen, dass es genügt, sich auf ein kleinräumiges und ein großräumiges Netz – wie in Abbildung 7-1 dargestellt – zu beschränken.

Um zu zeigen, dass die nachfolgenden Untersuchungen auch in Netzen mit größeren Höhenunterschieden analoge Ergebnisse hervorbringen, werden in Kapitel 7.5 Ergebnisse für das südliche bayerische Teilnetz (identisch mit dem aus Abbildung 4-11) präsentiert.

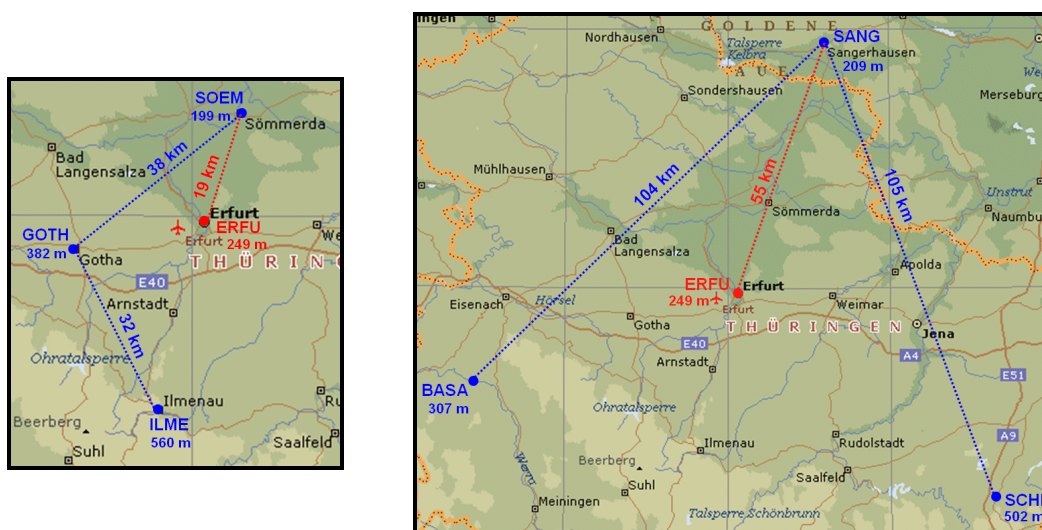


Abbildung 7-1: Links: kleinräumiges Netz; rechts: großräumiges Netz

Des Weiteren haben vorherige Untersuchungen angedeutet, dass eine Modellierung der Flächenkorrekturparameter (FKP) über mehr als drei Referenzstationen im Normalfall keinen Genauigkeitsgewinn bei Verwendung der hier vorgestellten Interpolationsverfahren erzielt. Es werden also lediglich Untersuchungen in einzelnen Dreiecksmachen durchgeführt, d.h. es erfolgt eine zweiparametrische (breiten- und längenabhängige) FKP-Modellierung.

Außerdem wird untersucht, wie sich der Ausfall einer bzw. zweier Referenzstationen sowohl im klein- als auch im großräumigen Netz auf die Positionierungsgenauigkeit auswirkt.

Es sind viele verschiedene Simulationsszenarien denkbar, bei denen das Pseudostrecken- und Trägerphasenrauschen, der Mehrwege-Fehler, der Ionosphärenfehler sowie der Troposphärenfehler variiert. Da aber in der Realität der Ionosphärenfehler am stärksten variieren kann, wird sich auf Szenarien mit unterschiedlichen ionosphärischen Bedingungen konzentriert. Das Trägerphasenrauschen wird auf einen Bereich von 1-3 mm festgelegt. Der Mehrwege-Fehler, wie in Kapitel 6.5 beschrieben, wird auf ein typischerweise vorkommendes Maß begrenzt, d.h. ca. 37% des maximalen theoretischen Mehrwege-Fehlers. Für den Troposphärenfehler wird ein „worst case“ Szenario angenommen, d.h. es wird eine Wetterfront mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h und einer Dauer von 50 min sowie einer Amplitude in Zenitrichtung von 4 cm simuliert – ein derartiges Ereignis ist zwar in Deutschland eher selten, aber möglich.

Für die Ionosphäre wurden unterschiedliche Simulationsansätze gewählt, die Zeiten

geringer, mittlerer sowie starker Ionosphärenaktivität repräsentieren. Hierbei werden so genannte „medium scale“ TID's sowie zusätzlich eine starke Ab- bzw. Zunahme der ionosphärischen Laufzeitverzögerung innerhalb recht kurzer Zeit – analog zu Abbildung 3-10 bis Abbildung 3-12, die einen ionosphärischen Sturm zeigen – simuliert. Die entsprechenden Szenarien sind in Tabelle 7-1 aufgeführt und mit „M I“ bis „M VII“ bezeichnet.

„Medium scale“ Szenarien	
Amplitude [TEC] / Dauer [min] / Geschw. [km/h]	
Amplitude [m] / Dauer [min]	
M I	0,1 / 45 / 130
M II	1,0 / 45 / 180 + 0,6 / 25
M III	1,5 / 45 / 180 + 0,8 / 25
M IV	2,3 / 45 / 180 + 1,2 / 25
M V	3,0 / 45 / 180 + 1,7 / 25
M VI	3,7 / 45 / 180 + 2,0 / 25
M VII	4,5 / 45 / 180 + 2,2 / 25

Tabelle 7-1: Simulationseinstellungen für die Ionosphäre

Um über eine ausreichende Anzahl von Positionierungsergebnissen zu verfügen, wurde jeweils ein Zeitraum über 5 Stunden simuliert und über 40 sec Intervalle positioniert; als Elevationsmaske wurde ein Winkel von 15° angesetzt. Als à-priori Ionosphärenmodell wurde immer das Klobuchar-Modell sowie als Troposphärenmodell das TropGrid-Modell verwendet.

Wie in Kapitel 5.2.4 angedeutet, wurde die Rover-Positionierung immer mit Hilfe der ANSA-Methode (s. Kapitel 5.2.5) vorgenommen. Hierbei wurde für jedes Szenario versucht, das Kalman-Filter optimal zu initialisieren und zu konfigurieren. Da es bei den hier vorgestellten Untersuchungen jedoch primär darum geht, den Einfluss modernisierter sowie neuer Satellitennavigationssysteme abzuschätzen, werden geringe Unzulänglichkeiten in der Optimierung des Kalman-Filters hingenommen, die sich tlw. in den nachfolgend aufgeführten Ergebnissen niederschlagen können – hierzu näheres bei den jeweiligen Ergebnissen.

7.1 Kleinräumiges Netz

Für das kleinräumige Netz wurden für alle sieben Szenarien jeweils Positionierungen für die „klassische“ GPS-Konfiguration – *L1* und *L2* – sowie eine künftige GPS/GALILEO-Konfiguration – GPS *L1/L5* und GALILEO *E1/E5a* – durchgeführt. Die über die gesamten 5 Stunden – gemittelten – Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt. Inwieweit die Mehrdeutigkeiten korrekt, falsch oder nicht fixiert werden konnten, ist Tabelle 7-2 bzw. Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3 zu entnehmen.

Schon in diesem Teilnetz mit vergleichsweise geringen Stationsabständen erkennt man den Vorteil einer Nutzung von zwei Satellitennavigationssystemen. Bei einer stärkeren Ionosphärenaktivität können bei Nutzung der „klassischen“ GPS-Konfiguration vermehrt Mehrdeutigkeiten nicht mehr fixiert werden. Bei der Nutzung von zwei Frequen-

Szenario	L1+L2	L1+L5 und E1+E5a
M I	100,0 / 0 / 0	99,7 / 0 / 0,3
M II	99,9 / 0 / 0,1	99,7 / 0 / 0,3
M III	99,9 / 0 / 0,1	99,7 / 0 / 0,3
M IV	99,9 / 0 / 0,1	99,7 / 0 / 0,3
M V	99,5 / 0 / 0,5	99,5 / 0 / 0,5
M VI	96,4 / 0,1 / 3,5	99,5 / 0 / 0,5
M VII	95,4 / 0 / 4,6	99,5 / 0 / 0,5

Tabelle 7-2: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar) für kleinräumiges Netz

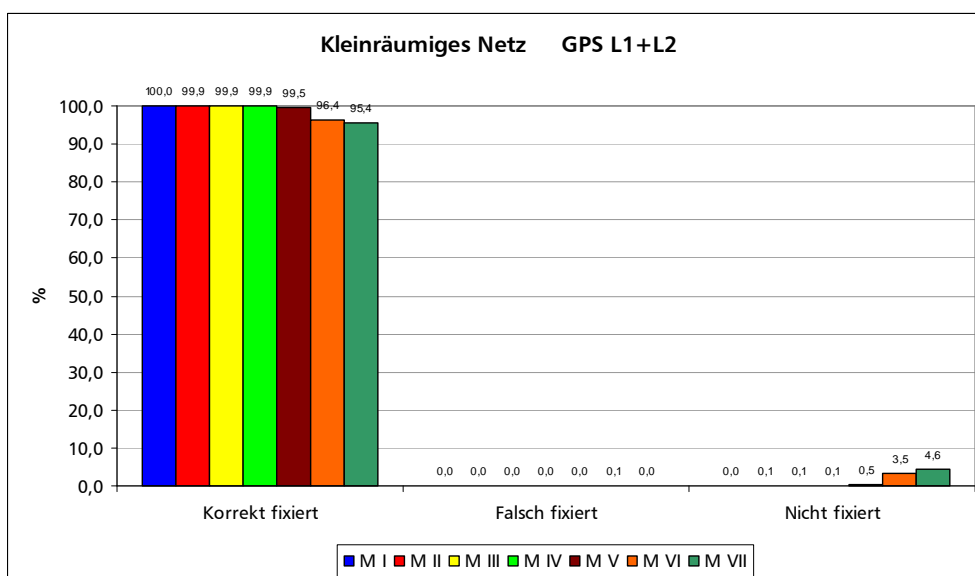


Abbildung 7-2: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar)

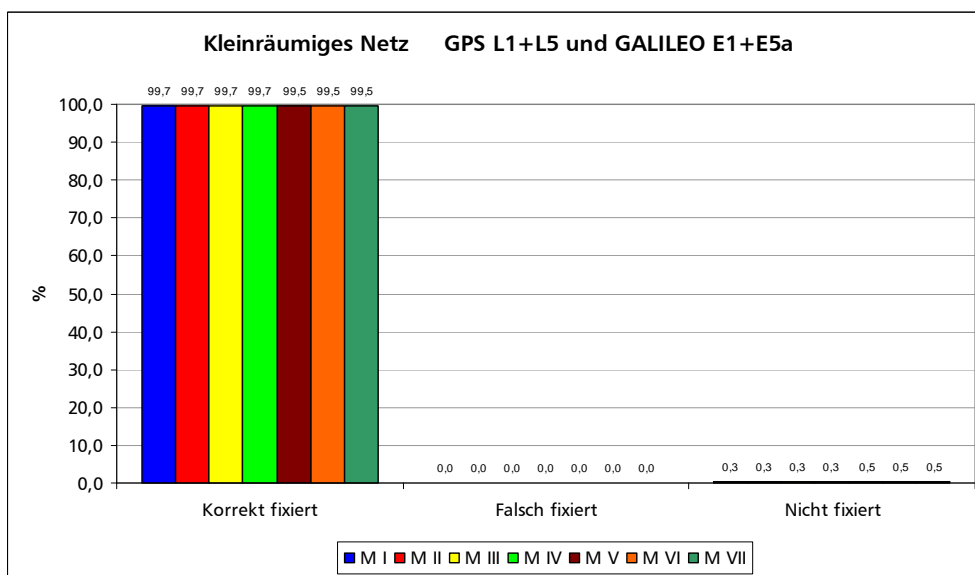


Abbildung 7-3: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar)

zen zweier Satellitennavigationssysteme – es stehen also ca. doppelt so viele Beobachtungen zur Verfügung – ist jedoch bei zunehmender Ionosphärenaktivität keine signifikante Senkung der Mehrdeutigkeitslösungsrate festzustellen.

Betrachtet man den dreidimensionalen Positionsfehler (Abbildung 7-4 und Abbildung 7-5), so erkennt man analog zur Statistik der Mehrdeutigkeitsfixierung die schlechtere Performance für die „klassische“ 2-Frequenz GPS-Konfiguration. Da die Positionierung immer mit einer ionosphärenfreien Linearkombination erfolgt, beinhaltet der verbleibende Positionsfehler hauptsächlich noch nicht korrigierte troposphärische Laufzeitverzögerungen, die aber in diesem kleinräumigen Netz noch weitgehend durch die Differenzbildung aufgrund vorhandener räumlicher Korrelationen eliminiert werden. Der vergleichsweise hohe Wert an Positionsfehlern größer als 10 cm bei der Nutzung von GPS

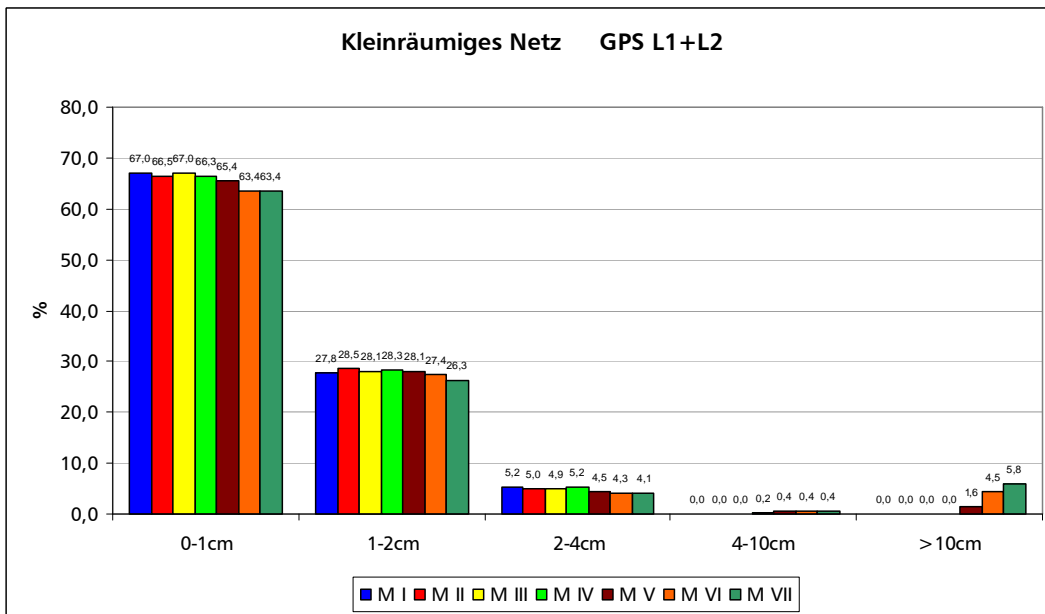


Abbildung 7-4: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen

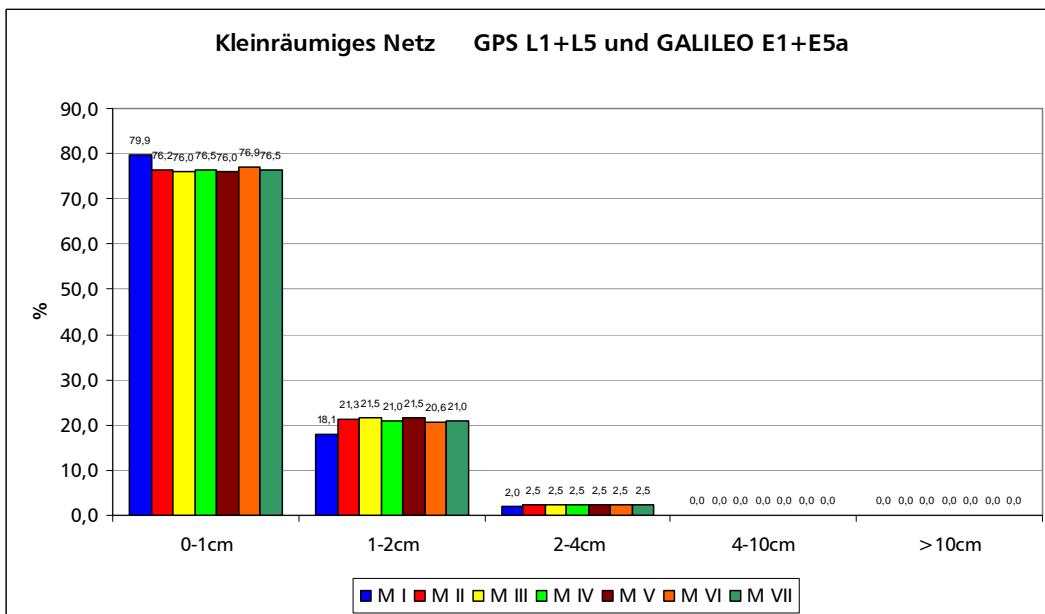


Abbildung 7-5: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen

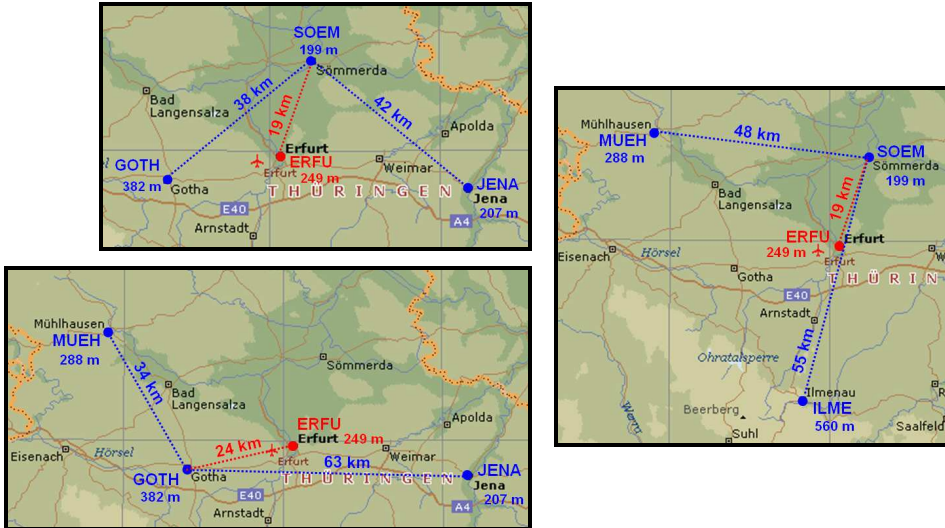


Abbildung 7-7: Netzkonfiguration beim Ausfall einer Station und Hinzunahme einer entsprechend nächstgelegenen Station im kleinräumigen Netz

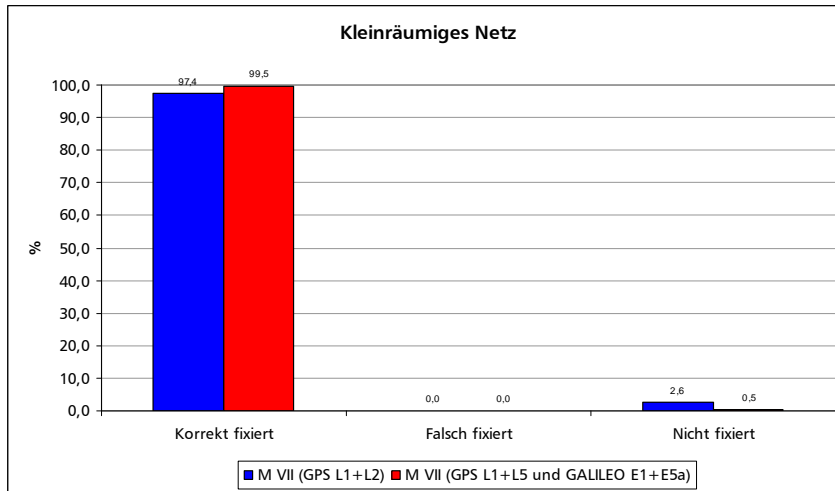


Abbildung 7-8: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar) beim Ausfall einer Referenzstation

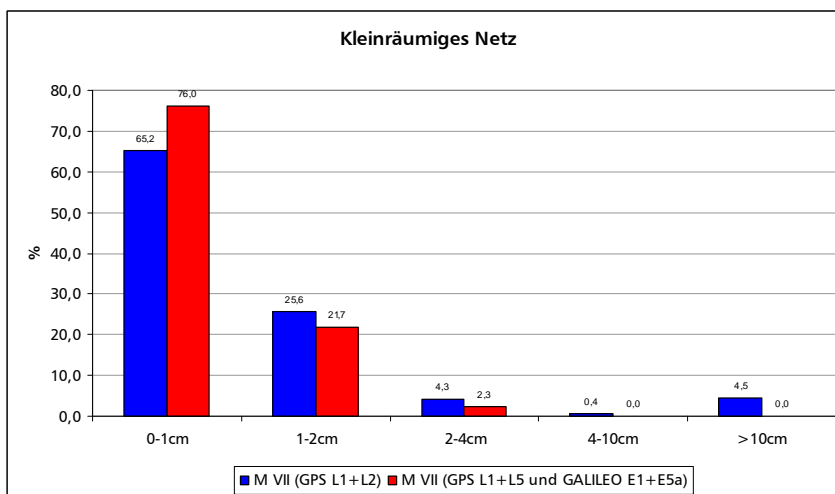


Abbildung 7-9: 3D-Positionsfehler für Szenario M VII beim Ausfall einer Referenzstation

7.1.2 Ausfall zweier Stationen

Fallen gleich zwei Referenzstationen gleichzeitig aus, so müssen diese ebenfalls durch die beiden nächstgelegenen, sich in Betrieb befindlichen Referenzstationen ersetzt werden. Es ergeben sich wiederum, wie in Abbildung 7-10 dargestellt, drei mögliche neue Netzkonfigurationen, wobei die „schlechteste“ Konfiguration auf der rechten Seite gewählt wurde.

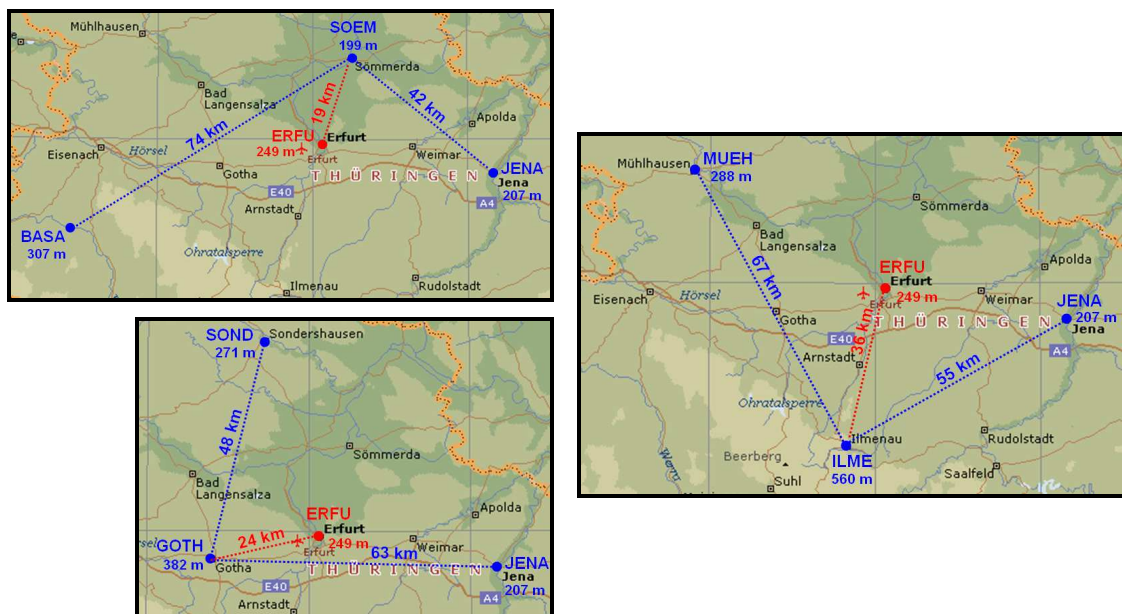


Abbildung 7-10: Netzkonfiguration beim Ausfall von zwei Stationen und Hinzunahme zweier entsprechend nächstgelegener Stationen im kleinräumigen Netz

Beim Ausfall zweier Referenzstationen werden die Mehrdeutigkeiten auf einem identischen Niveau korrekt fixiert wie bei einer Netzwerkkonfiguration ohne Ausfall einer Referenzstation, s. Abbildung 7-11. Jedoch ist der dreidimensionale Positionsfehler – wie in Abbildung 7-12 zu erkennen – sowohl bei der Nutzung von GPS L1/L2 als auch bei der kombinierten Nutzung von GPS L1/L5 und GALILEO E1/E5a durchweg größer. Dies kann man hauptsächlich mit der fast doppelten Basislinienlänge bei der Rover-

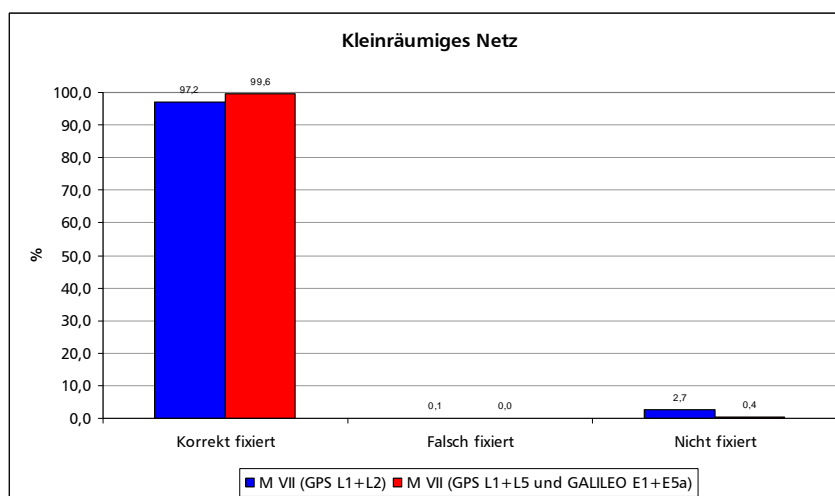


Abbildung 7-11: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar) beim Ausfall zweier Referenzstation

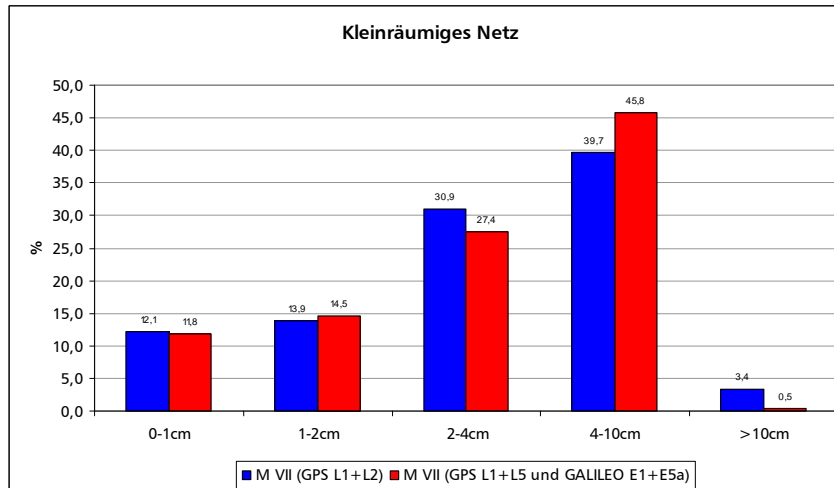


Abbildung 7-12: 3D-Positionsfehler für Szenario M VII beim Ausfall zweier Referenzstationen

Positionierung begründen, da sich dadurch der troposphärische Restfehler stärker auswirkt. Zu dieser Problematik sei an dieser Stelle auch auf Kapitel 7.3 verwiesen.

7.2 Großräumiges Netz

Beim großräumigen Netz erfolgt die Ableitung der Flächenkorrekturparameter in einer Dreiecksmasche mit einer Basislinienlänge von ca. 100 km und eine Roverpositionierung über eine Basislinienlänge von 55 km – also einer ca. dreifach längeren Basislinie als im kleinräumigen Netz.

Bei der Mehrdeutigkeitsfixierung (s. Tabelle 7-3 bzw. Abbildung 7-13 und Abbildung 7-14) kann man ebenfalls den klaren Vorteil einer Nutzung von GPS und GALILEO erkennen. Jedoch steigt hier die Rate der nicht bzw. falsch fixierten Mehrdeutigkeiten bei der Nutzung von GPS *L1/L2* schon bei einer geringeren Ionosphärenaktivität stärker an. Bei der 2-Frequenz-Nutzung von GPS und GALILEO werden jedoch auch in diesem ausgedünnten Referenzstationsnetz keine Mehrdeutigkeiten fehlfixiert (die Fehlfixierungsrate von 0,3% bei Szenario M III kann man auf eine nicht ganz optimale Konfiguration des Kalman-Filters zurückführen). Die Rate der fixierten Mehrdeutigkeiten im Falle einer stärkeren Ionosphärenaktivität ließe sich durch eine etwas längere Beobachtungsdauer erhöhen.

Szenario	L1+L2	L1+L5 und E1+E5a
M I	99,9 / 0 / 0,1	99,9 / 0 / 0,1
M II	98,8 / 0 / 1,2	99,8 / 0 / 0,2
M III	98,8 / 0 / 1,2	99,2 / 0,3 / 0,5
M IV	94,1 / 0,3 / 5,6	99,1 / 0 / 0,9
M V	92,2 / 1,1 / 6,7	99,3 / 0 / 0,7
M VI	90,8 / 1,8 / 7,4	98,7 / 0 / 1,3
M VII	90,8 / 2,3 / 6,9	98,7 / 0 / 1,3

Tabelle 7-3: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar)

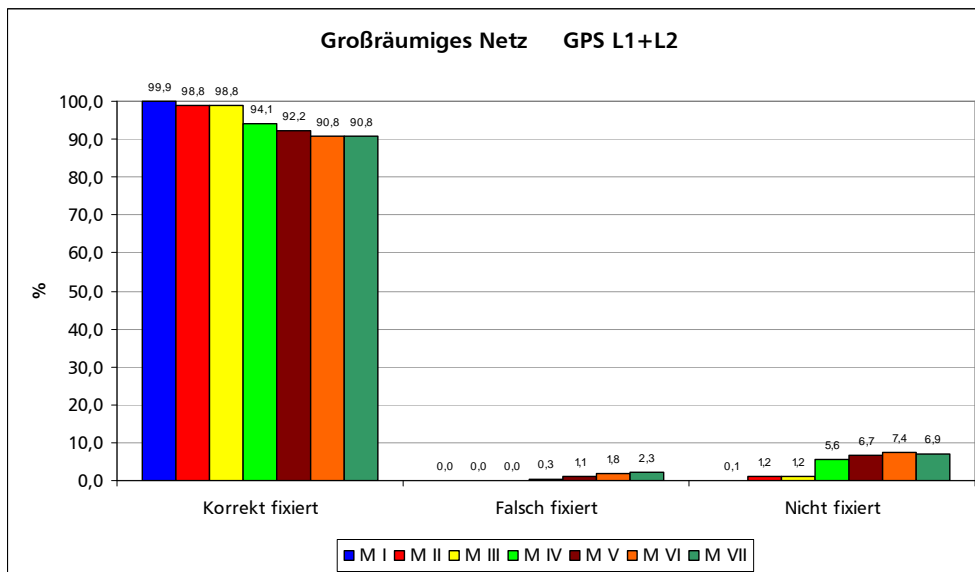


Abbildung 7-13: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar)

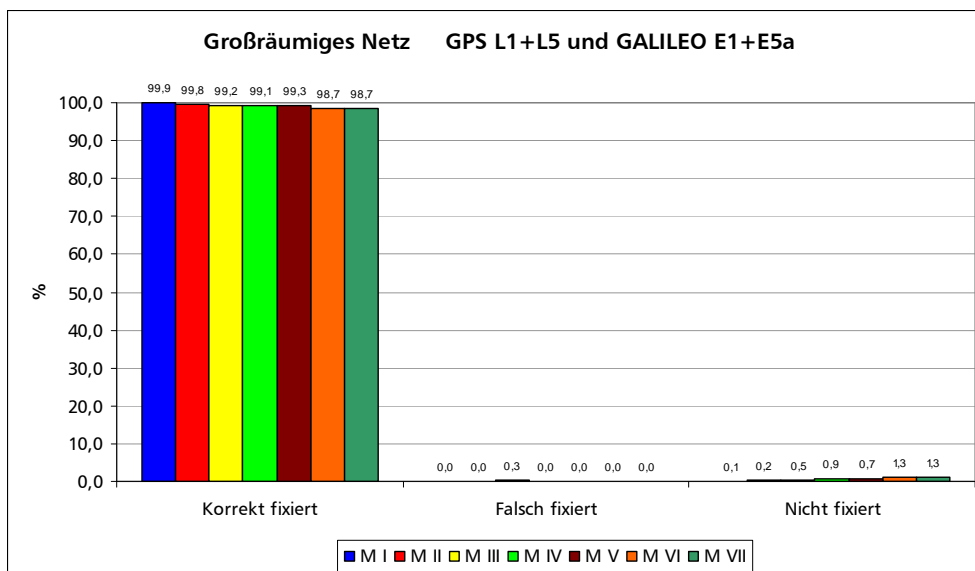


Abbildung 7-14: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar)

Der dreidimensionale Positionsfehler (Abbildung 7-15 und Abbildung 7-16) ist im Durchschnitt sowohl mit GPS L1/L2 als auch mit GPS L1/L5 und GALILEO E1/E5a deutlich größer. Dies ist durch die deutlich längere Basislinie zu begründen, da bei der Positionierung mit der ionosphärenfreien Linearkombination der residuelle stationsspezifische troposphärische Restfehler nicht kompensiert wurde. Auch hier sei auf eine Untersuchung in Kapitel 7.3 verwiesen, bei der gezeigt werden kann, dass eine gleichzeitige Mitschätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung bei der Bestimmung der PDGPS-Lösung den dreidimensionalen Positionsfehler deutlich reduzieren kann.

Der deutlich größere Anteil an Positionsfehlern größer als 10 cm bei der Nutzung von GPS L1/L2 ist auf die höhere Rate an nicht fixierten Mehrdeutigkeiten zurückzuführen.

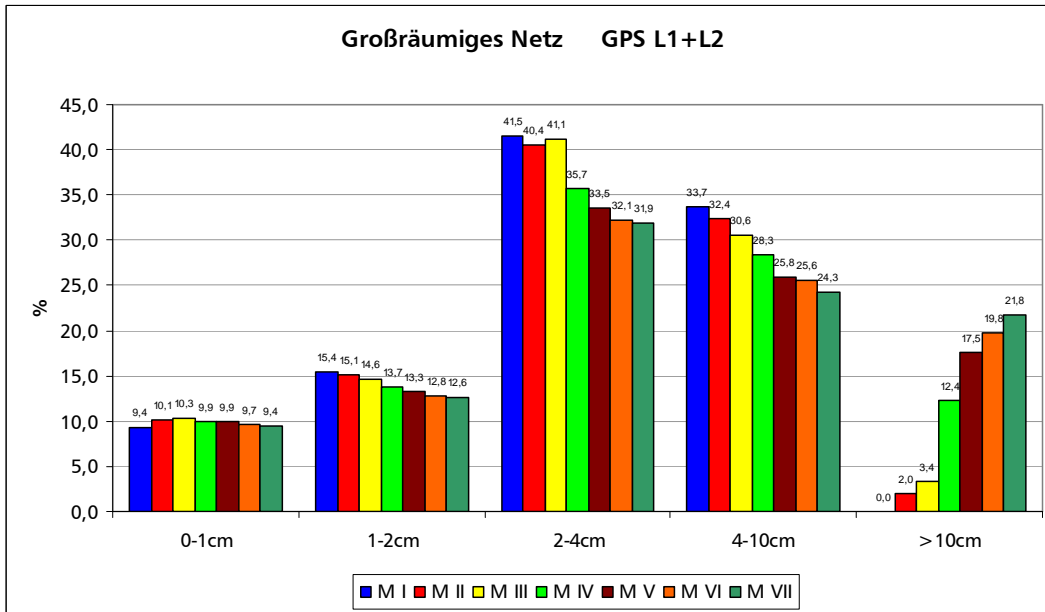


Abbildung 7-15: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen

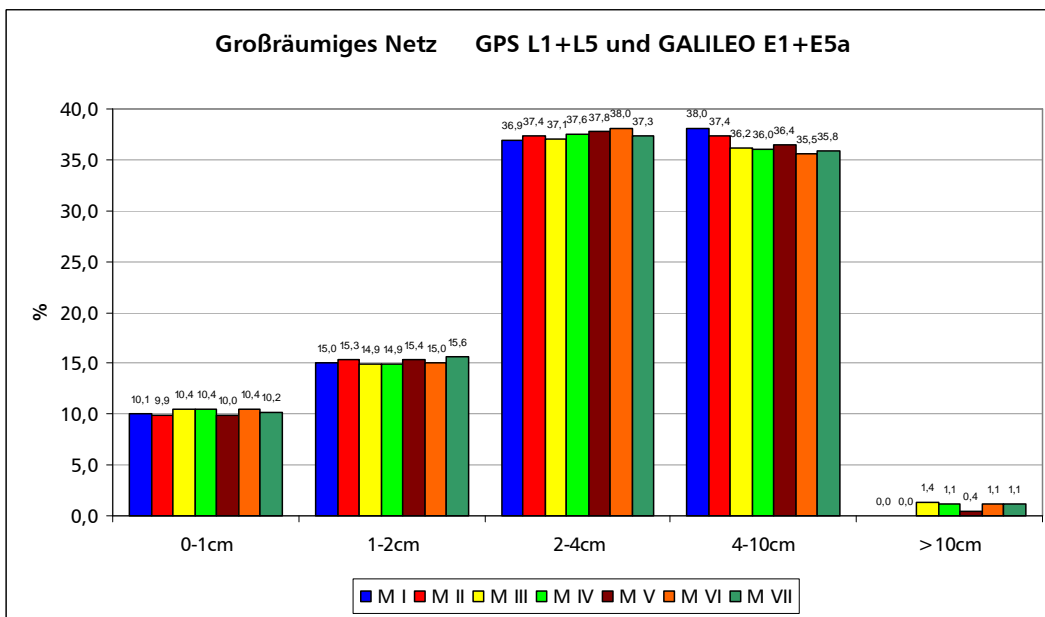


Abbildung 7-16: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen

Der zweidimensionale, horizontale Positionsfehler wie in Abbildung 7-17 dargestellt beträgt bei der gleichzeitigen Nutzung von GPS L1/L5 und GALILEO E1/E5a in nahezu 100% der Fälle weniger als 4 cm. Dagegen muss bei der „klassischen“ Nutzung von GPS L1/L2 schon bei etwas stärkerer Ionosphärenaktivität mit größeren Positionsfehlern gerechnet werden, was in der Realität nur durch längere Beobachtungszeiten zu vermeiden ist.

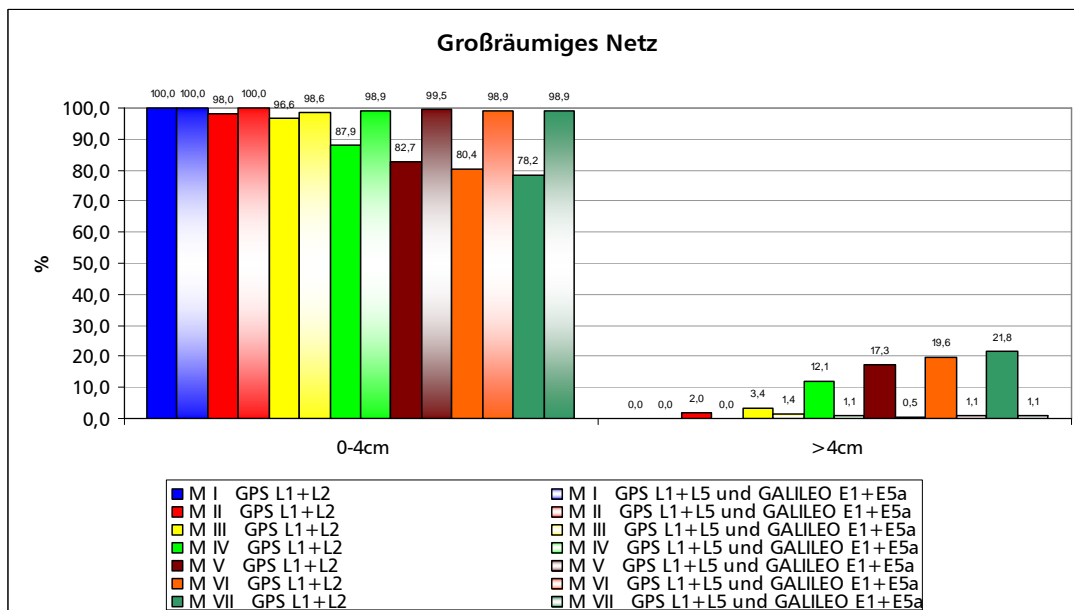


Abbildung 7-17: Horizontaler Positionsfehler, eingeteilt in 2 Genauigkeitsklassen

7.2.1 Ausfall einer Station

Beim Ausfall einer Referenzstation im großräumigen Netz sind wiederum drei unterschiedliche Ersatz-Dreiecksmaschen möglich. Für die nachfolgende Untersuchung wurde die Konfiguration links oben aus Abbildung 7-18 gewählt. Dabei ändert sich nicht die Basislinienlänge zur Rover-Positionierung; lediglich eine Basislinie, die zur Ableitung der Flächenkorrekturparameter herangezogen wird, verlängert sich um ca. 30 km.



Abbildung 7-18: Netzkonfiguration beim Ausfall von einer Station und Hinzunahme einer entsprechend nächstgelegenen Station im großräumigen Netz

Aus Abbildung 7-19 ist zu entnehmen, dass sich der Ausfall einer Referenzstation im großräumigen Netz nicht negativ auf die Statistik der Mehrdeutigkeitsfixierung auswirkt. D.h. es wird in beiden Netzkonfigurationen – ohne Ausfall und bei Ausfall einer Station – ziemlich genau die gleiche Anzahl an Mehrdeutigkeiten korrekt fixiert.

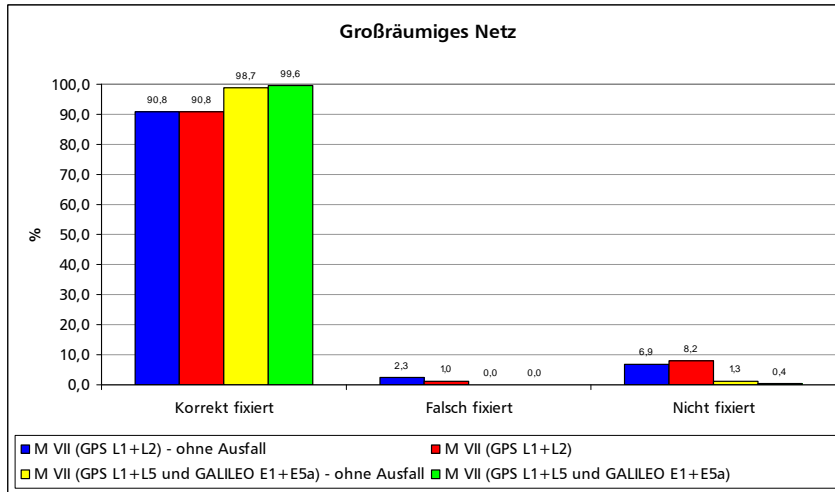


Abbildung 7-19: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar)

Wie zu erwarten, liegt der dreidimensionale Positionsfehler ohne Ausfall einer Referenzstation (s. Abbildung 7-20) im gleichen Bereich wie beim Ausfall einer Referenzstation (s. Abbildung 7-21). Dies kann dadurch begründet werden, dass beide Netzkonfigurationen sehr ähnlich sind und sich vor allem nicht die Basislinienlänge bei der Rover-Positionierung verändert, was ansonsten eine Verstärkung der Restfehler zur Folge hätte.

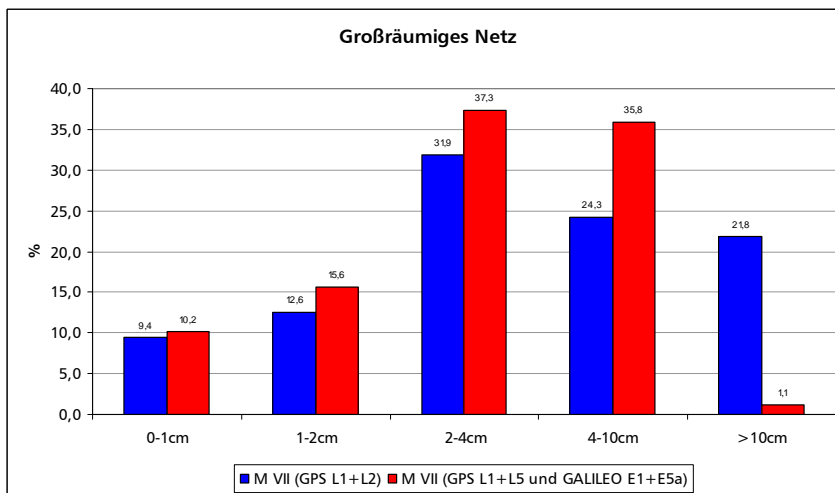


Abbildung 7-20: 3D-Positionsfehler für Szenario M VII ohne Ausfall einer Referenzstation

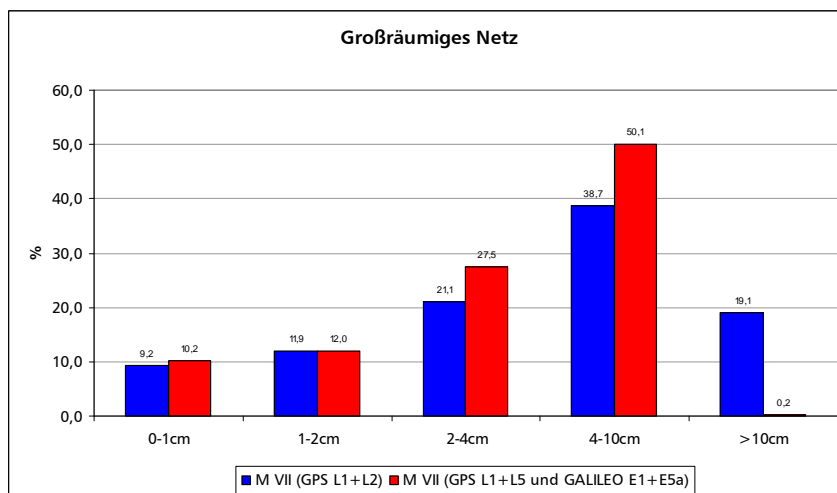


Abbildung 7-21: 3D-Positionsfehler für Szenario M VII beim Ausfall einer Referenzstation

7.2.2 Ausfall zweier Stationen

Für das Szenario, dass zwei Referenzstationen gleichzeitig ausfallen, wurde aus den in Abbildung 7-22 drei möglichen, angepassten Netzkonfigurationen die Konfiguration links oben gewählt. Hierbei verlängert sich die Basislinienlänge bei der Rover-Positionierung um ca. 20 km.

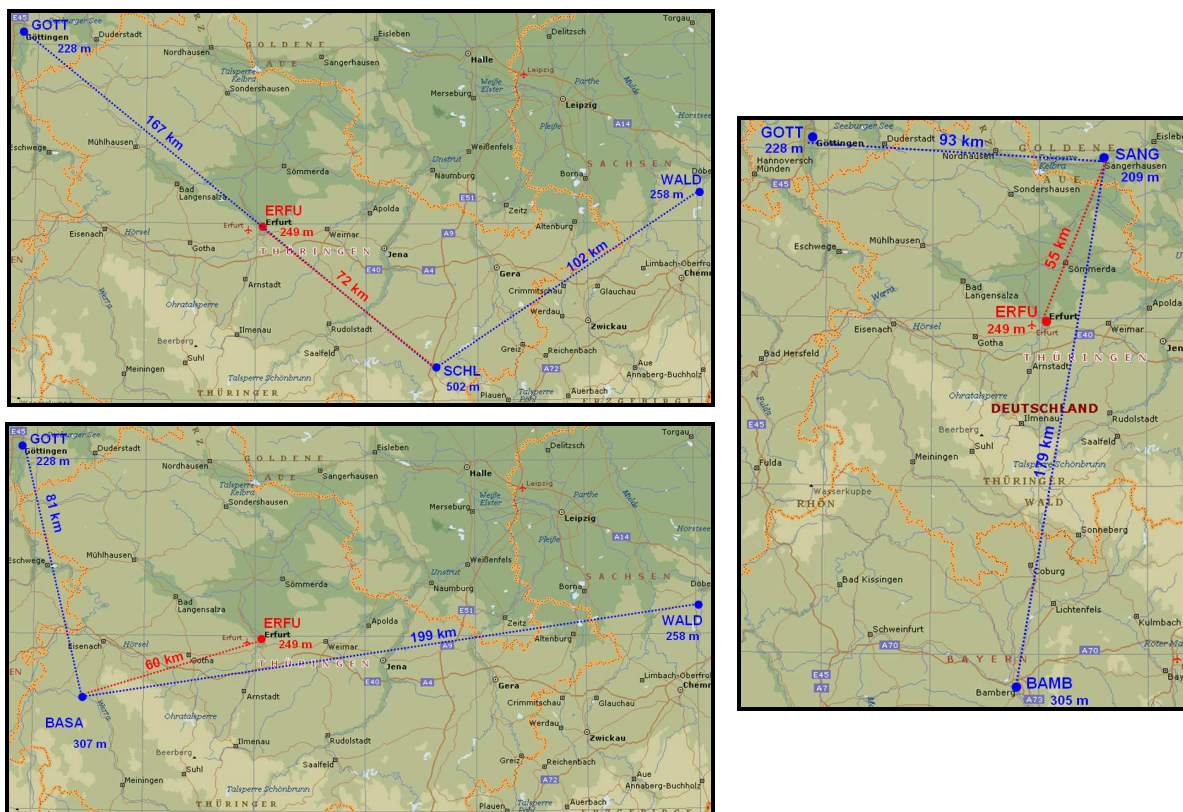


Abbildung 7-22: Netzkonfiguration beim Ausfall von zwei Stationen und Hinzunahme zweier entsprechend nächstgelegener Stationen im großräumigen Netz

Die Statistik der Mehrdeutigkeitsfixierung (s. Abbildung 7-23) ähnelt der Statistik beim Ausfall von nur einer Referenzstation. Dahingegen verschlechtert sich der mittlere

dreidimensionale Positionsfehler (s. Abbildung 7-24), was hauptsächlich auf die längere Basislinienlänge zurückzuführen ist. Man kann also festhalten, dass sich auch im großräumigen Netz der Ausfall einer oder zweier Referenzstationen nur dann negativ auswirkt, wenn eine Referenzstation, die nur eine kurze Distanz zum Rover aufweist, ausfällt, da dann eine Positionierung über eine längere Basislinie erfolgen muss und somit eventuelle Restfehler nicht so stark eliminiert werden können.

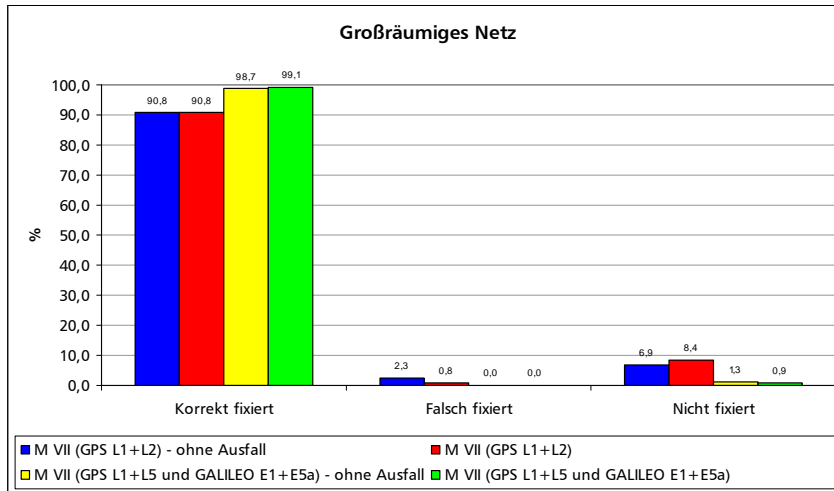


Abbildung 7-23: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar)

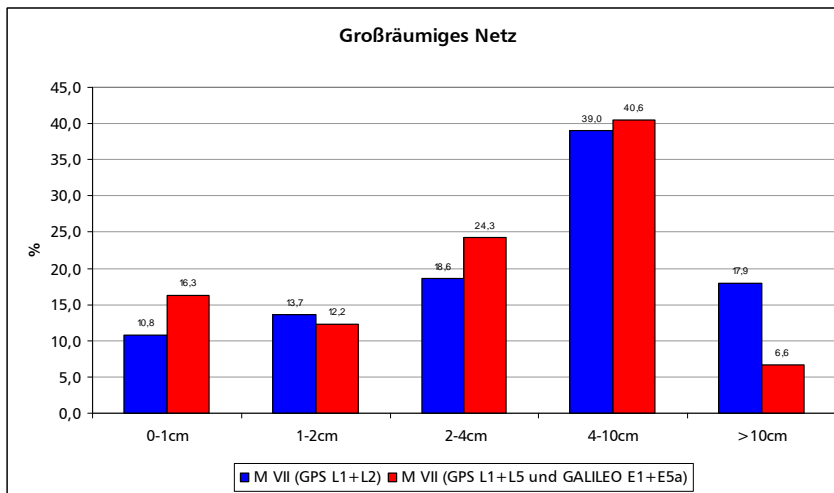


Abbildung 7-24: 3D-Positionsfehler für Szenario M VII

7.3 Netz mit 100 km Basislinienlänge

Unabhängig von der derzeitigen *SAPOS*[®]-Konfiguration mit einem durchschnittlichen Referenzstationsabstand von ca. 30-60 km und einer daraus resultierenden, maximalen Basislinienlänge von ca. 35 km bei der Rover-Positionierung, soll hier noch ein Netzwerk mit erheblich längeren Basislinienlängen – bis zu ca. 100 km, wie sie durchaus in anderen, dünner besiedelten Flächenländern zu finden sind – untersucht werden. Hierzu wurde eine Dreiecksmasche mit einer Basislinienlänge von ca. 170 km (s. Abbildung 7-25) verwendet.

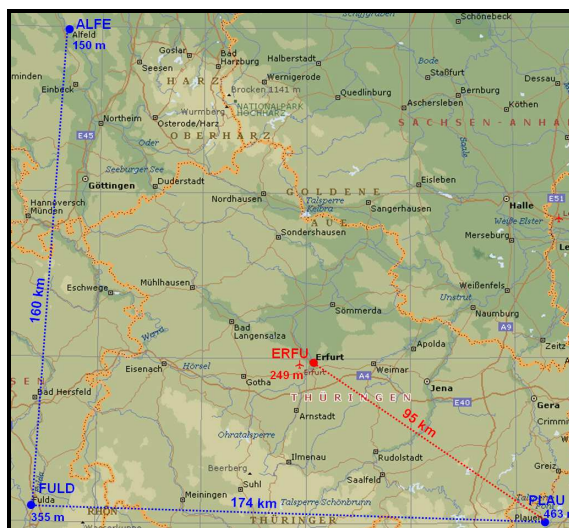


Abbildung 7-25: Netzwerkkonfiguration für Rover-Positionierungen bis zu einer Basislinienlänge von ca. 100 km

Neben dem Vergleich einer „klassischen“ GPS-Nutzung auf *L1/L2* zu einer zukünftigen kombinierten 2-Frequenz-Nutzung von GPS und GALILEO (*L1/L5* und *E1/E5a*) werden anhand dieses Netzwerkes weitere Positionierungsansätze untersucht:

- Kapitel 7.3.2: Nutzung von drei Frequenzen
- Kapitel 7.3.3: Mitschätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung
- Kapitel 7.3.4: Szenario mit geringerer troposphärischer Störung
- Kapitel 7.3.5: Kinematische Rover-Positionierung
- Kapitel 7.3.6: Nutzung des stationspezifischen Korrekturansatzes (Troposphäre)

7.3.1 Nutzung von zwei Frequenzen

Für die Untersuchungen in diesem Netzwerk wurden die gleichen Szenarien verwendet wie sie in Tabelle 7-1 aufgeführt sind. Es wurde lediglich auf das Szenario mit der stärksten Ionosphärenaktivität M VII verzichtet.

Hier zeigt sich – wie in Tabelle 7-4 bzw. Abbildung 7-26 und Abbildung 7-27 dargestellt – noch um einiges deutlicher die Überlegenheit der Nutzung von zwei Satellitennavigationssystemen. Schon bei relativ geringer ionosphärischer Aktivität steigt die Rate der nicht bzw. falsch fixierten Mehrdeutigkeiten bei der Nutzung von GPS *L1/L2* schnell an. Bei der gleichzeitigen Nutzung von GPS *L1/L5* und GALILEO *E1/E5a* bleibt hingegen selbst bei sehr starker Ionosphärenaktivität sowohl die Rate der fehlfixierten Mehrdeutigkeiten als auch die der nicht fixierten Mehrdeutigkeiten sehr klein.

Szenario	L1+L2	L1+L5 und E1+E5a
M I	99,1 / 0,2 / 0,7	99,8 / 0 / 0,2
M II	88,4 / 2,0 / 9,6	98,7 / 0 / 1,3
M III	75,9 / 5,1 / 19,0	98,9 / 0,1 / 1,0
M IV	64,4 / 8,3 / 27,3	98,2 / 0,2 / 1,6
M V	51,7 / 11,5 / 36, 8	97,8 / 0 / 2,2
M VI	44,2 / 16,8 / 39,0	97,0 / 0,3 / 2,7

Tabelle 7-4: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar)

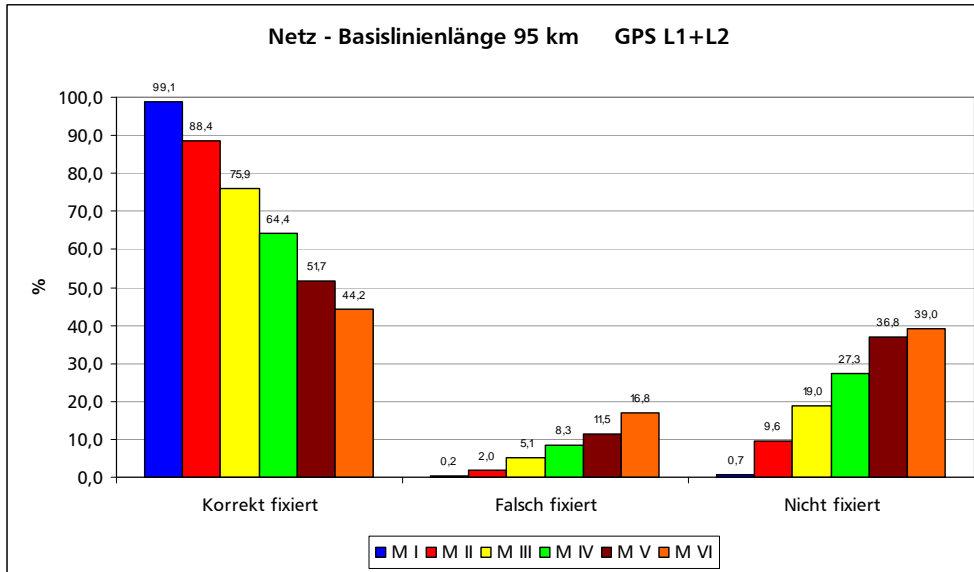


Abbildung 7-26: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar)

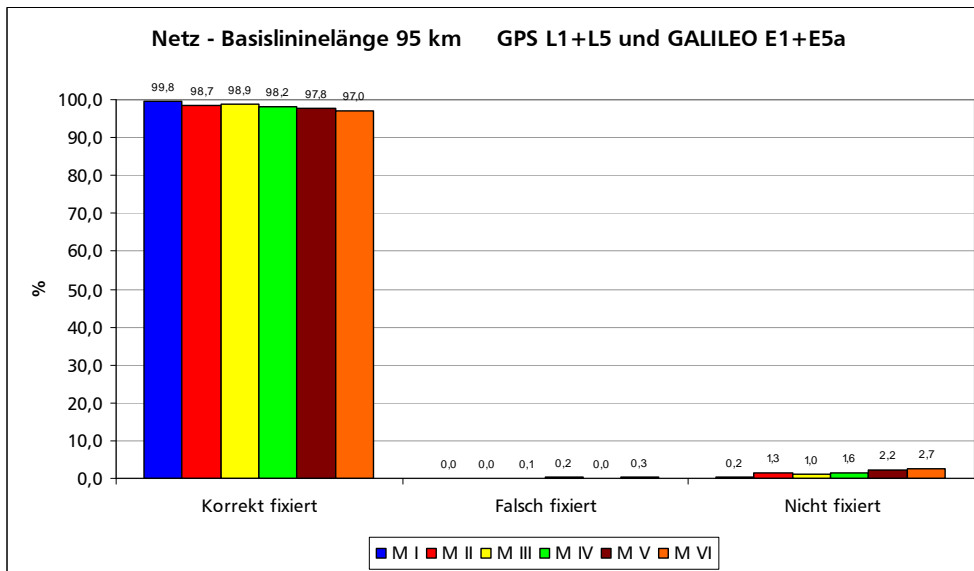


Abbildung 7-27: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar)

Der dreidimensionale Positionsfehler ist aufgrund der vergleichsweise großen Basislinienlänge relativ hoch, s. Abbildung 7-28 und Abbildung 7-29. Jedoch kann man erkennen, dass bei der Nutzung von nur GPS L1/L2 bei stärkerer Ionosphärenaktivität in nahezu jedem 40 sec-Positionierungsintervall einzelne Mehrdeutigkeiten nicht fixiert werden können, so dass der Positionsfehler deutlich größer als 10 cm ist.

Die Problematik des verbleibenden hauptsächlich troposphärischen Restfehlers beim Bestimmen der PDGPS-Lösung, der die Positionsgenauigkeit bei dieser Basislinienlänge nicht unerheblich beeinflusst, wird am Ende dieses Unterkapitels behandelt.

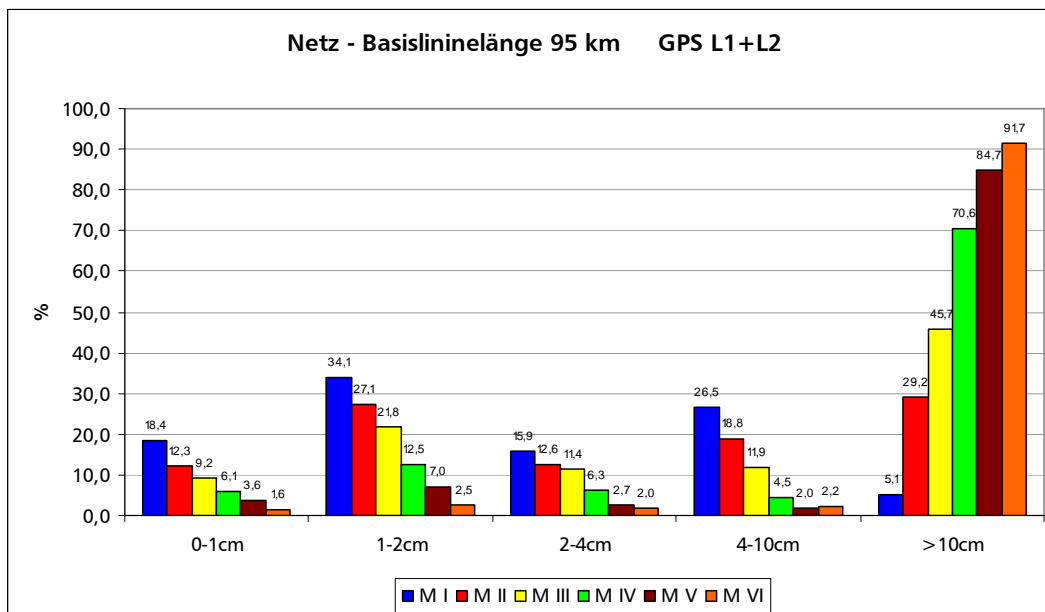


Abbildung 7-28: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen

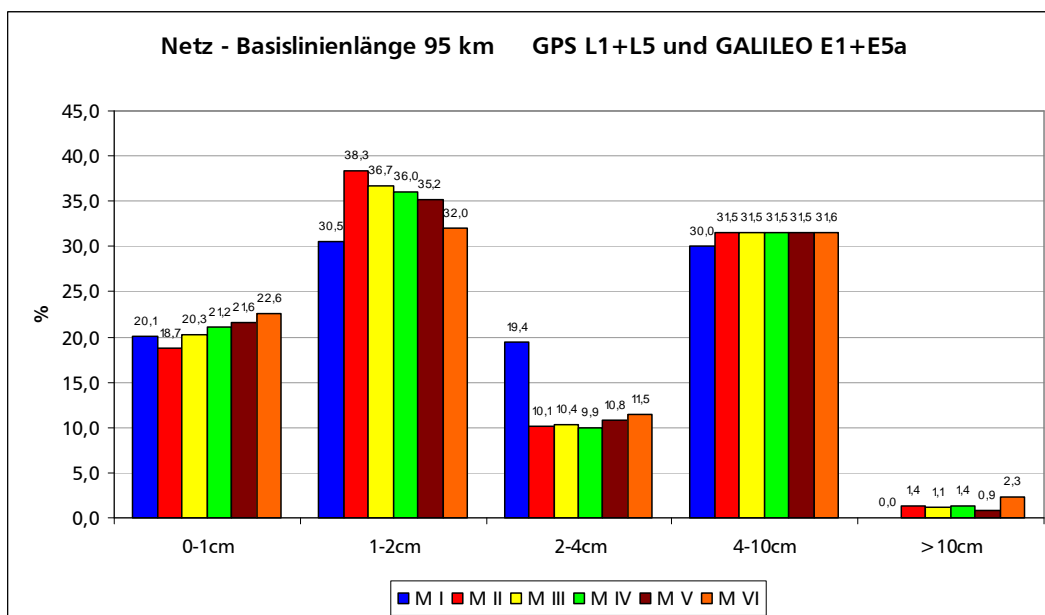


Abbildung 7-29: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen

Vergleicht man den zweidimensionalen Positionsfehler (s. Abbildung 7-30) mit dem im großräumigen SAPOS[®]-Netz abgeleiteten 2D-Positionsfehler (s. Abbildung 7-17), so muss man feststellen, dass bei größeren Basislinienlängen schon bei etwas stärkerer Ionosphärenaktivität die Nutzung des GPS 2-Frequenz-Systems (L1/L2) bei einer Beobachtungsdauer von nur 40 sec keine zufrieden stellenden Ergebnisse liefert. Dahingegen kann auch über längere Basislinien mit einem kombinierten GPS/GALILEO 2-Frequenz-Systems (L1/L5 bzw. E1/E5a) eine hohe Positionsgenauigkeit erreicht werden.

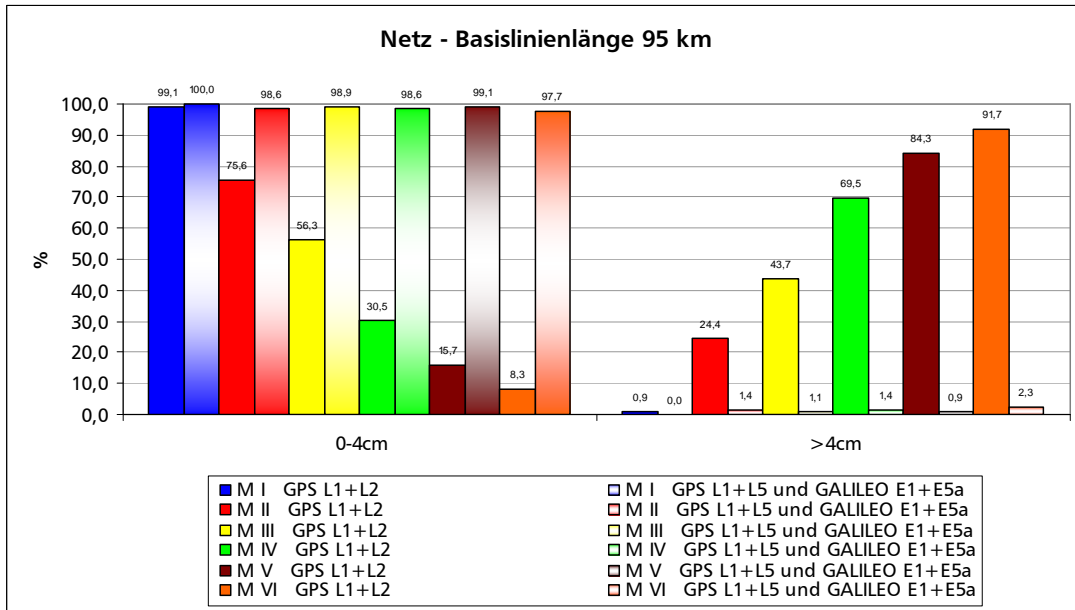


Abbildung 7-30: Horizontaler Positionsfehler, eingeteilt in 2 Genauigkeitsklassen

An dieser Stelle wird hier noch exemplarisch ein Vergleich der Erfolgsrate („success rate“) – der Wahrscheinlichkeit, dass die ganzzahligen Mehrdeutigkeiten korrekt fixiert wurden, s. auch Kapitel 5.2.2 – unter der Verwendung von nur GPS L1/L2 bzw. GPS L1/L5 und GALILEO E1/E5a vorgenommen. Dazu erfolgte die Positionierung des Rovers (Netzwerkkonfiguration wie in Abbildung 7-25) über einen Zeitraum von 120 sec bei moderaten Ionosphärenverhältnissen (Szenario M III). In Abbildung 7-31 erkennt man die klare Überlegenheit einer kombinierten Nutzung von GPS und GALILEO, bei der schon nach gut 10 sec eine success rate von nahezu 100% erreicht wird, gegenüber der alleinigen Nutzung von GPS, bei der erst nach ca. 1 min ein vergleichbares Niveau erreicht wird.

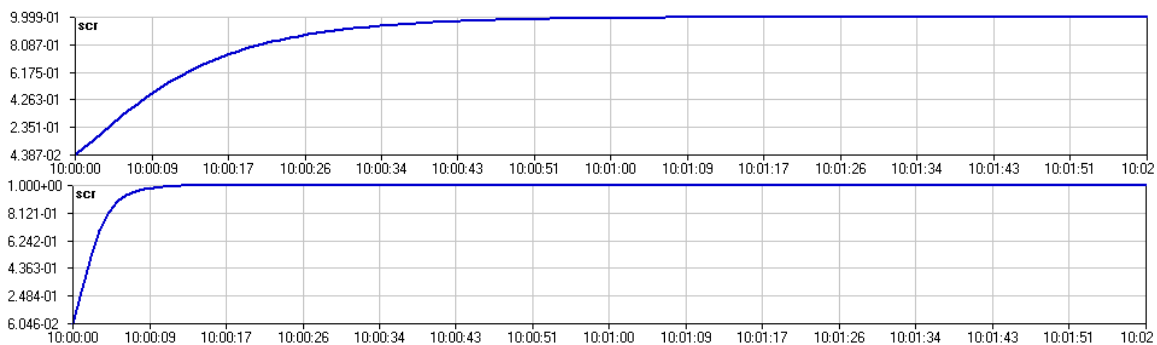


Abbildung 7-31: „Success rate“ für nur GPS L1/L2 (oben) bzw. GPS L1/L5 und GALILEO E1/E5a (unten) bei einer Positionierung über 120 sec

7.3.2 Nutzung von drei Frequenzen

Im Folgenden wurde noch untersucht, inwieweit die Nutzung von drei Frequenzen – für GPS L1/L2/L5 und für GALILEO E1/E5a/E5b – Vorteile gegenüber der Nutzung von zwei Frequenzen bringt. Betrachtet man die Statistik der Mehrdeutigkeitsfixierung in Abbildung 7-32 bzw. die des dreidimensionalen Positionsfehlers in Abbildung 7-33, so erkennt man, dass zwar mit GPS L1/L2/L5 mehr Mehrdeutigkeiten als mit GPS L1/L2

fixiert werden können. Den großen Genauigkeitsschub erreicht man aber erst durch die gemeinsame Nutzung von GPS und GALILEO. Durch die Nutzung eines kombinierten GPS/GALILEO 3-Frequenzsystems kann gegenüber einem 2-Frequenzsystem jedoch offenbar kein Genauigkeitserfolg erzielt werden. Es ist jedoch an dieser Stelle anzumer-

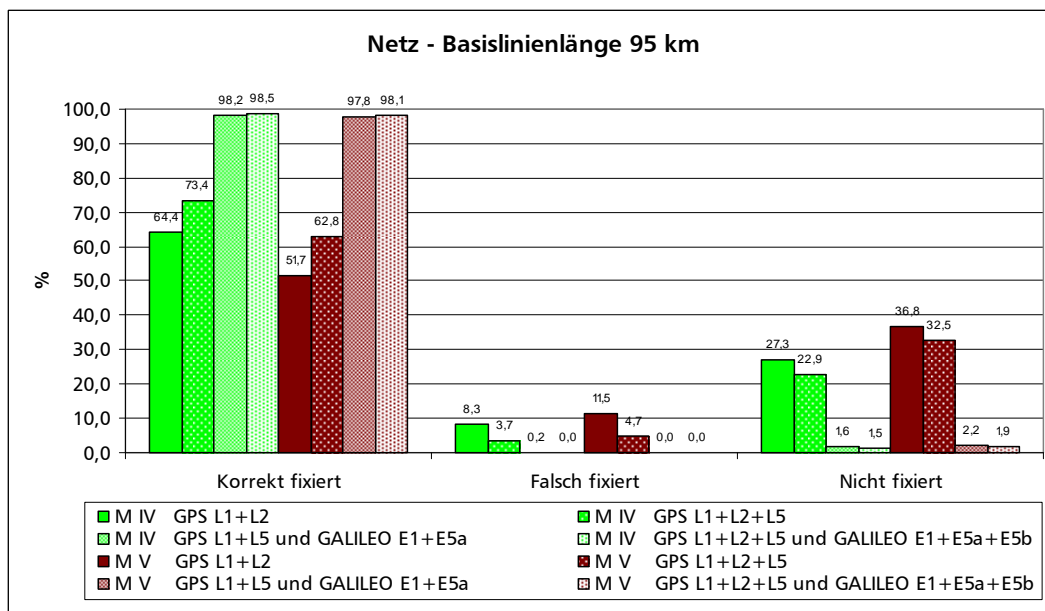


Abbildung 7-32: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar) für die Szenarien M IV bzw. M V; Nutzung von 2 oder 3 Frequenzen

ken, dass die Nutzung von drei Frequenzen mit einem geometriefreien Lösungsansatz durchaus Vorteile haben kann, hier aber ein geometriebasierter Ansatz verwendet wurde.

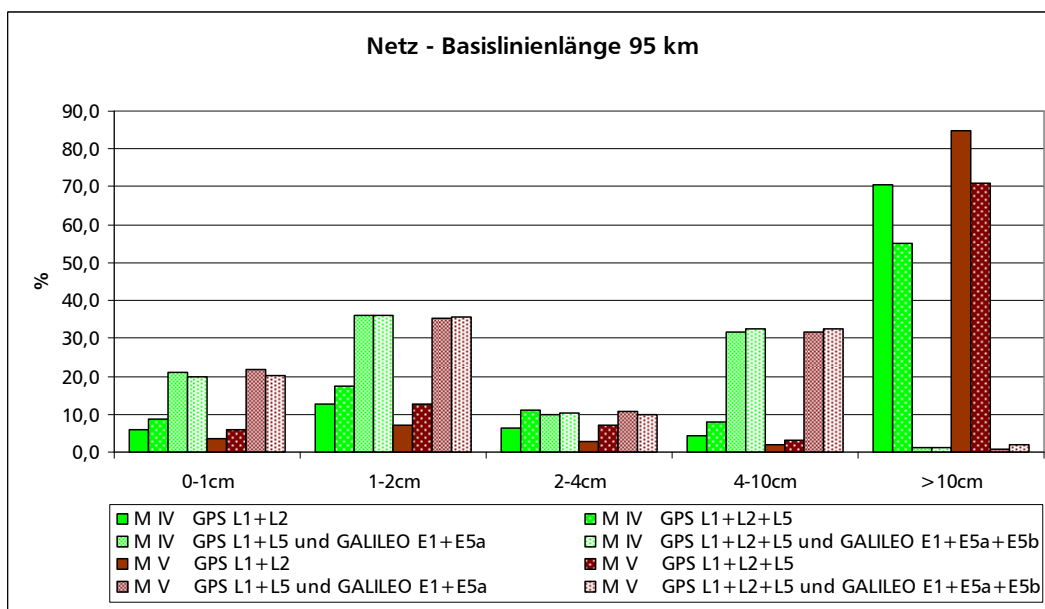


Abbildung 7-33: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen

7.3.3 Mitschätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung

Für das Szenario M V wurde abweichend vom bisherigen Vorgehen bei der Bestimmung der endgültigen PDGPS-Lösung – also nach der Mehrdeutigkeitsfixierung mit Hilfe der ANSA-Methode (s. Kapitel 5.2.5) – zusätzlich die troposphärische Laufzeitverzögerung mitgeschätzt. Dieser Ansatz ist nicht mit der Mitschätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung innerhalb des Kalman-Filters bei der Bestimmung der Mehrdeutigkeiten zu verwechseln. Die Mitschätzung dort soll nur zu einer schnelleren Konvergenz des Mehrdeutigkeitsfixierungsalgorithmus führen; der dabei bestimmte Wert für die troposphärische Laufzeitverzögerung fließt aber nicht in die anschließende PDGPS-Positionierung ein, da dieser aufgrund der kombinierten Verwendung von Kodestrecken- und Trägerphasenbeobachtungen noch einen Restfehler im cm-Bereich aufweisen kann.

Damit kann durch die gleichzeitige Nutzung der ionosphärenfreien Linearkombination und der Mitschätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung der atmosphärische Restfehler bei der Positionsbestimmung weitestgehend eliminiert werden.

Wie Abbildung 7-34 im Vergleich zu Abbildung 7-33 zu entnehmen ist, verbessert sich der dreidimensionale Positionsfehler bei der Verwendung von nur GPS (zwei oder drei Frequenzen) nicht, jedoch wird durch die Mitschätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung bei einer simultanen Nutzung von GPS und GALILEO der mittlere Positionsfehler deutlich verbessert. Durch die Nutzung von drei Frequenzen sowohl von GPS als auch von GALILEO erzielt man eine ähnlich gute korrekte Mehrdeutigkeitsfixierungsrate wie bei der Nutzung von nur zwei Frequenzen (GPS + GALILEO), s. Abbildung 7-35.

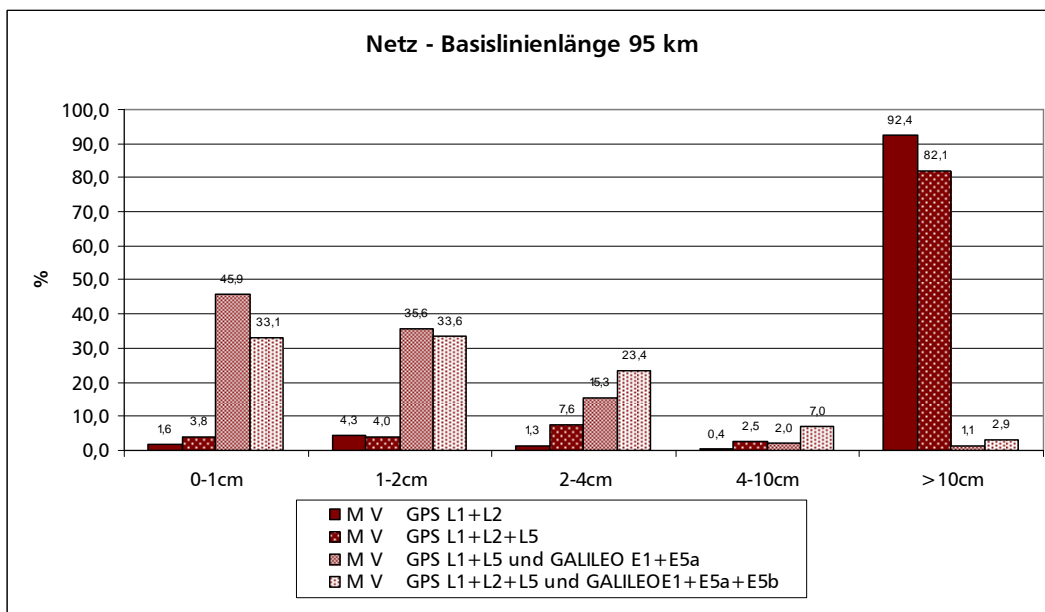


Abbildung 7-34: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; Mitschätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung bei der PDGPS-Positionierung

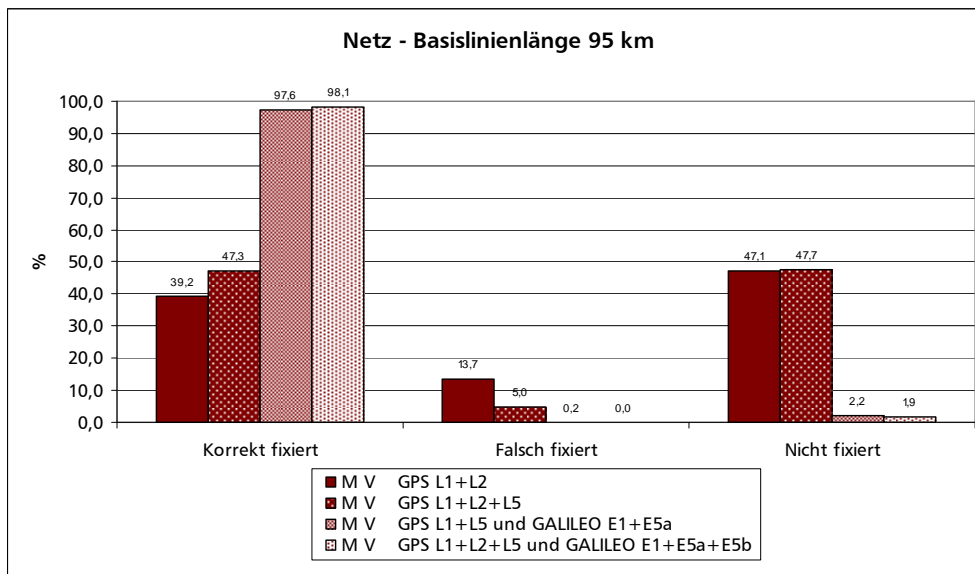


Abbildung 7-35: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar) für Szenario M V; Mitschätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung bei der PDGPS-Positionierung

7.3.4 Szenario mit geringerer troposphärischer Störung

Zusätzlich wurde ebenfalls für das Szenario M V Daten mit einem geringeren troposphärischen Zusatzfehler simuliert und ausgewertet. Hierbei wurde eine troposphärische Störung angenommen, die innerhalb von 90 min mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h vorbeizieht und innerhalb dieses Zeitraumes eine Änderung der troposphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung von 1 cm verursacht. Wie Abbildung 7-36 zu entnehmen ist, verringert sich hier der durchschnittliche dreidimensionale Positionsfehler noch einmal – bei der PDGPS-Positionierung wurde hier nicht zusätzlich die troposphärische Laufzeitverzögerung mitgeschätzt.

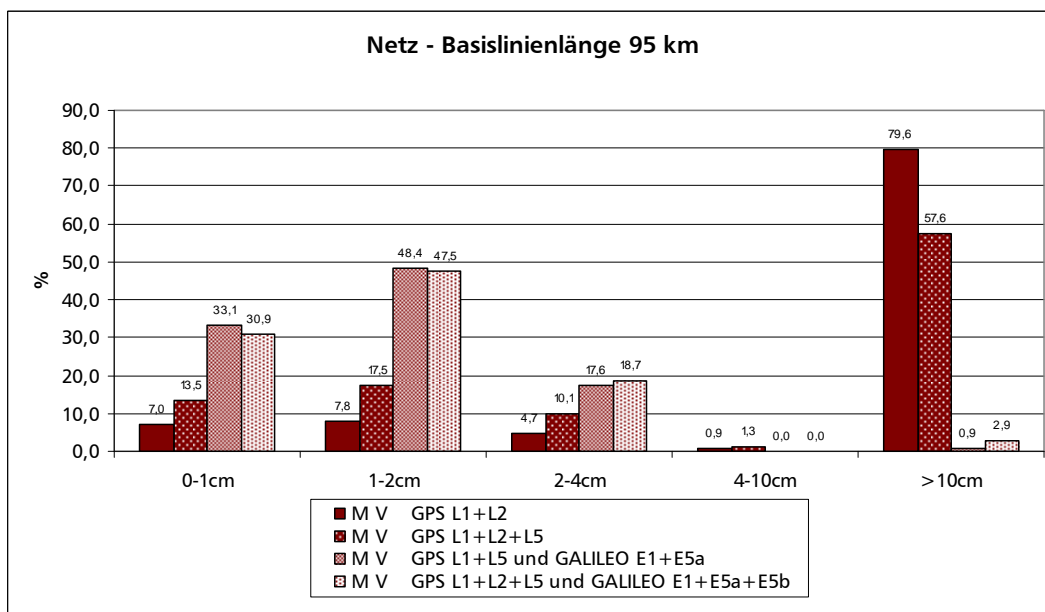


Abbildung 7-36: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; Simulation mit geringem Troposphärenfehler

7.3.5 Kinematische Rover-Positionierung

Hierbei wurden die identischen simulierten Daten wie in den Kapiteln 7.3.1 bis 7.3.3 verwendet, jedoch wurde für die PDGPS-Positionierung angenommen, dass der Rover nicht statisch ist, sondern sich bewegt. D.h. es wurde zwar wieder über einen Zeitraum von 40 sec versucht, die Mehrdeutigkeiten zu lösen, danach jedoch für jede Sekunde eine neue PDGPS-Lösung berechnet. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den dreidimensionalen (Abbildung 7-37) bzw. den horizontalen (Abbildung 7-38) Positionsfehler. Auch hier zeigt sich deutlich der Vorteil einer kombinierten Nutzung von GPS und GALILEO.

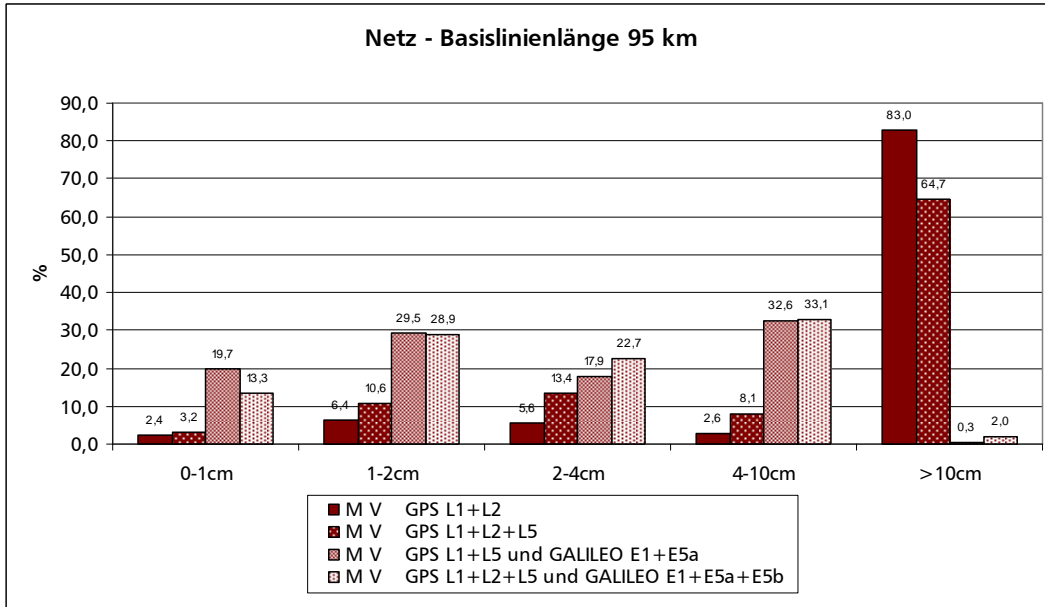


Abbildung 7-37: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen

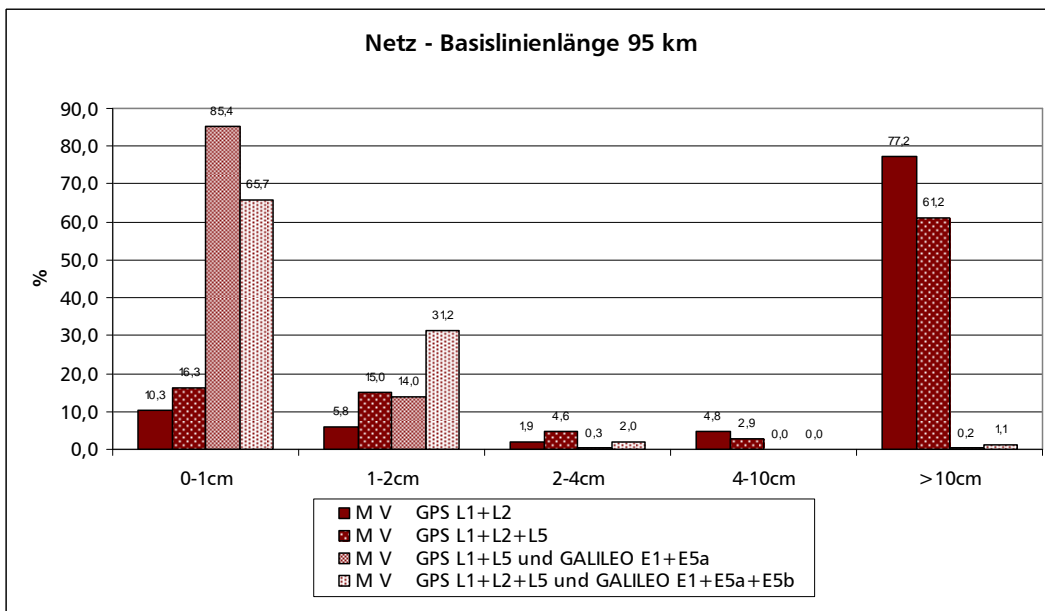


Abbildung 7-38: Horizontaler Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen

7.3.6 Nutzung des stationsspezifischen Korrekturansatzes (Troposphäre)

Für das Szenario M IV – also für Verhältnisse mit mittelstarker ionosphärischer Aktivität – wurde im Gegensatz zu allen anderen hier vorgestellten Prozessierungsergebnissen nicht der satelliten-spezifische (s. Kapitel 4.4.3.1), sondern der stations-spezifische (s. Kapitel 4.4.3.2) Korrekturansatz für die Troposphäre gewählt.

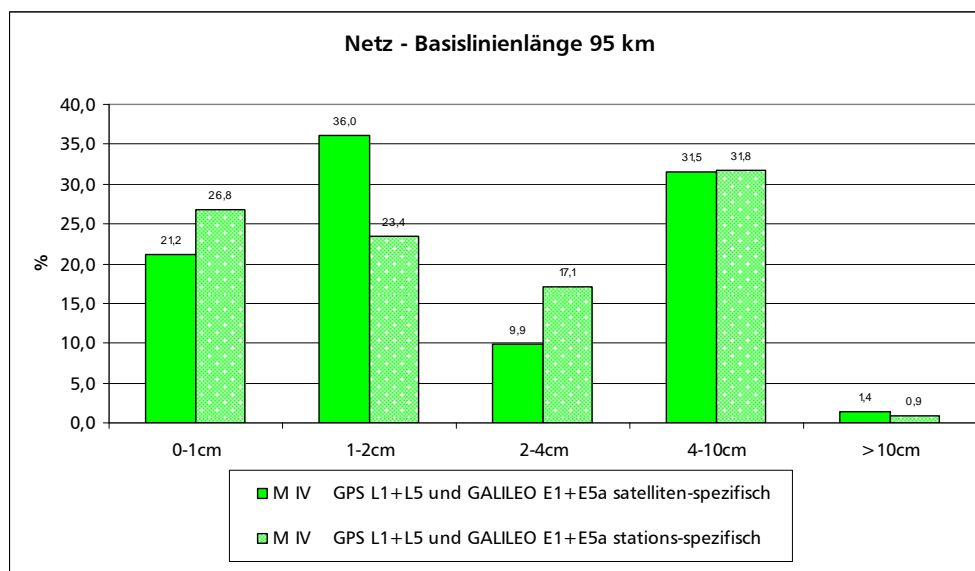


Abbildung 7-39: Horizontaler Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen

Wie Abbildung 7-39 zu entnehmen ist, ist bzgl. der Positionsgenauigkeit kein klarer Vorteil für den satelliten-spezifischen oder den stations-spezifischen Korrekturansatz für die Troposphäre zu erkennen; die Mehrdeutigkeitsstatistik – hier nicht dargestellt – ist für beide Korrekturansätze nahezu identisch. Dementsprechend können die beiden troposphärischen Korrekturansätze als gleichwertig angesehen werden. Lediglich bezüglich der Datenmenge ist beim stations-spezifischen Korrekturansatz ein Vorteil zu sehen, denn es muss nur ein Satz von Flächenkorrekturparametern für jede Epoche bereitgestellt werden – im Gegensatz zu ca. 8-24 (je nach Satellitensichtbarkeit und Nutzung von nur GPS oder GPS und GALILEO) Sätzen von Flächenkorrekturparametern beim satelliten-spezifischen Ansatz.

7.4 Netz mit 200 km Basislinienlänge

Abschließend soll eine Netzwerkkonfiguration mit einer noch mal doppelt so langen Basislinienlänge untersucht werden. Dazu wurde eine Dreiecksmasche mit Basislinienlängen von knapp 300 km verwendet (s. Abbildung 7-40), was zu einer maximalen Basislinienlänge für die Rover-Positionierung von ca. 200 km führt.

Hierbei wurde lediglich das Szenario M VI – d.h. sehr starke ionosphärische Aktivität – betrachtet. Des Weiteren wurde neben der Verwendung von zwei bzw. drei Frequenzen auch die Verwendung von vier bzw. fünf Frequenzen mit GALILEO getestet. Es zeigt sich auch bei diesem Netzwerk, dass sich vor allem mit der gleichzeitigen Verwendung von GPS und GALILEO eine deutlich höhere Rate an korrekt fixierten Mehrdeutigkeiten erzielen lässt, s. Abbildung 7-41. Im Gegensatz zu den vorherigen Netzwerken lässt sich allerdings die Statistik der Mehrdeutigkeitsfixierung durch die Verwendung von drei anstatt zwei Frequenzen noch einmal deutlich verbessern. Die Hinzunahme einer vierten

(E5ab) und einer fünften (E6) Frequenz bringt jedoch keine weiteren Vorteile mit sich.

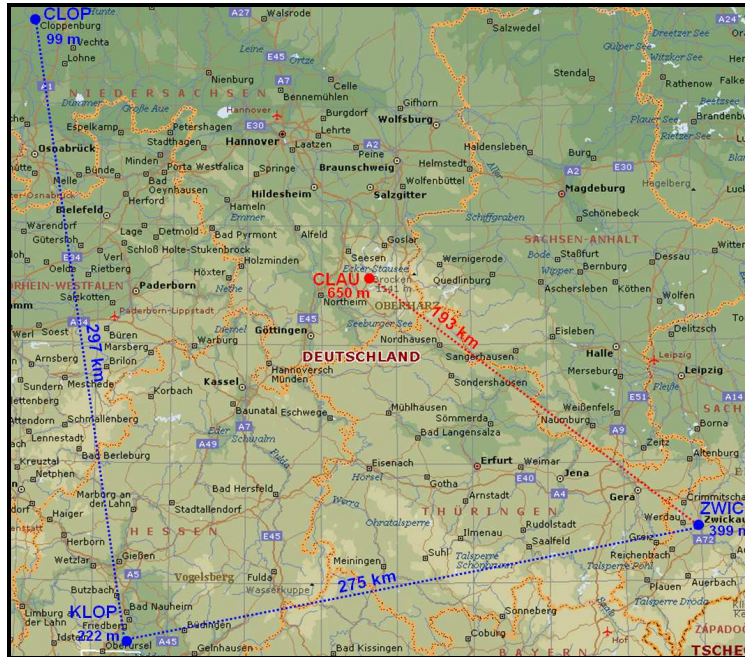


Abbildung 7-40: Netzwerkkonfiguration für Rover-Positionierungen bis zu einer Basislinienlänge von ca. 200 km

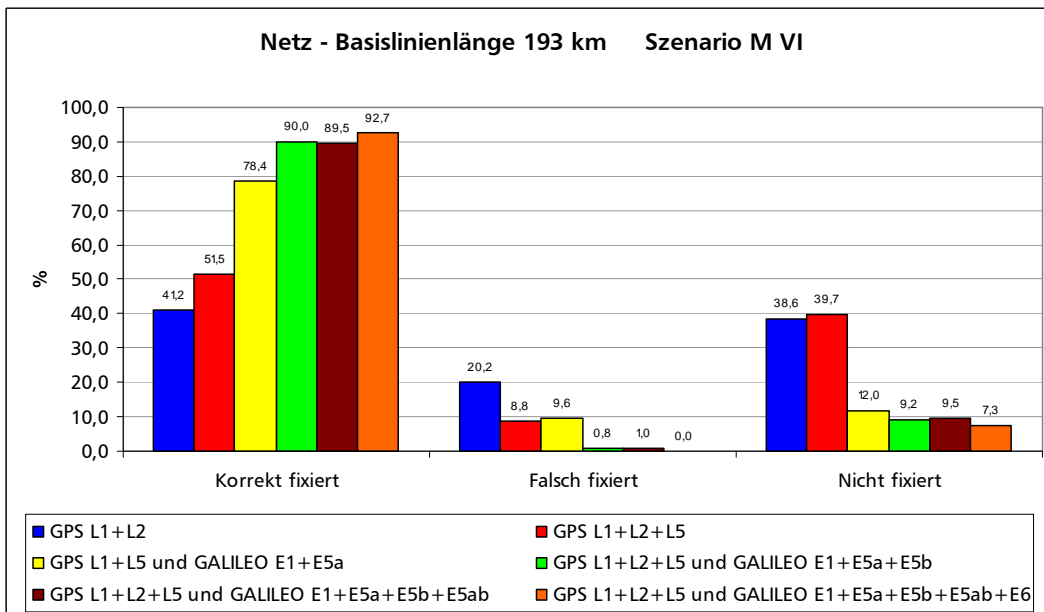


Abbildung 7-41: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar)

Bei der Statistik des dreidimensionalen Positionsfehlers (in Abbildung 7-42 ohne zusätzliche Schätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung, in Abbildung 7-43 mit zusätzlicher Schätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung bei der PDGPS-Positionierung) ist der klare Vorteil der kombinierten GPS und GALILEO Nutzung zu erkennen.

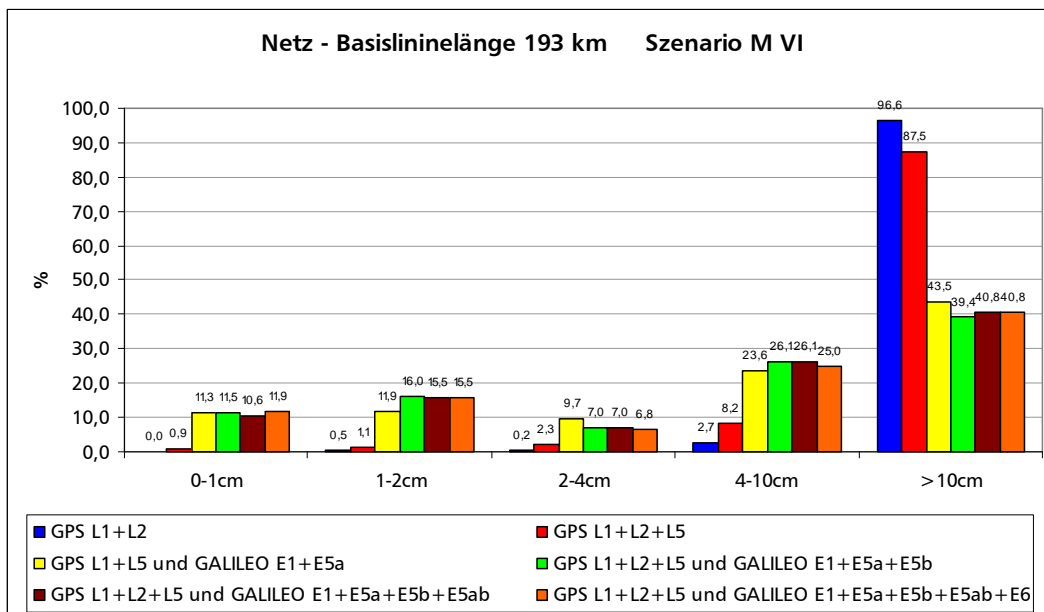


Abbildung 7-42: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen

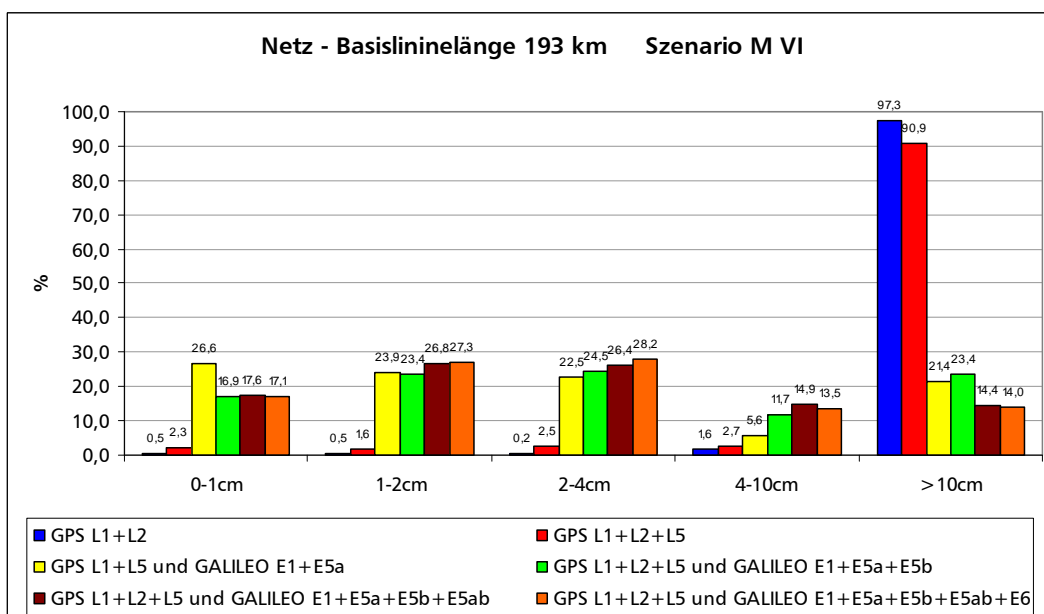


Abbildung 7-43: 3D-Positionsfehler, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; Mitschätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung bei der PDGPS-Positionierung

7.5 Netz Bayern

Im südlichen Teilnetz Bayern (s. Abbildung 4-11), das durch die Station GARM große Höhenunterschiede aufweist, wurden exemplarisch für das Szenario M V (stärkere ionosphärische Aktivität) Untersuchungen unter Nutzung von nur GPS bzw. GPS und GALILEO (zwei bzw. drei Frequenzen) durchgeführt. Die Mehrdeutigkeiten (s. Abbildung 7-44) konnten bei alleiniger Nutzung von GPS L1/L2 nicht alle korrekt fixiert werden, mit einer Hinzunahme von 2-Frequenz GALILEO Beobachtungen lässt sich jedoch eine beinahe 100%ige korrekte Mehrdeutigkeitsfixierung erzielen.

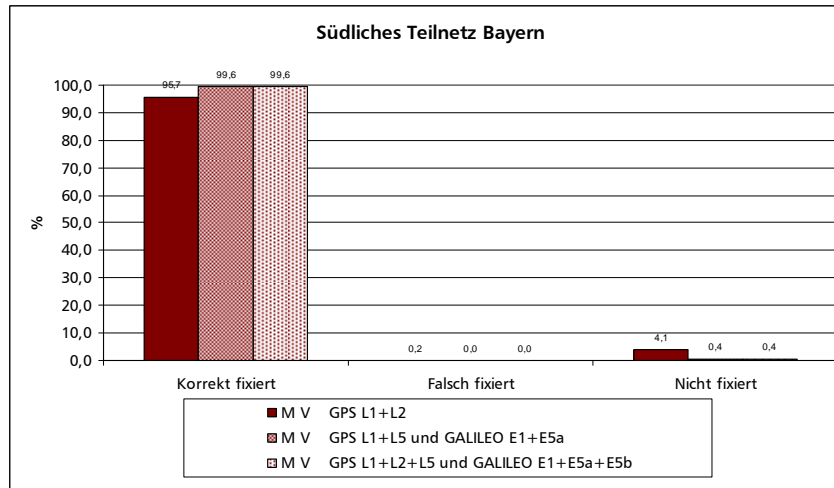


Abbildung 7-44: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar) für Szenario M V

Da bei der PDGPS-Lösung keine troposphärische Laufzeitverzögerung mitgeschätzt wurde (s. auch Anmerkungen in Kapitel 7.3.3), die Daten aber mit vergleichsweise hohen troposphärischen Restfehlern behaftet sind, ist der dreidimensionale Positionsfehler (s. Abbildung 7-45) entsprechend hoch. Da jedoch bei der gleichzeitigen Nutzung von GPS und GALILEO nahezu 100% der Mehrdeutigkeiten korrekt fixiert werden konnten, besteht der Positionsfehler dort hauptsächlich aus dem residuellen troposphärischen Fehler.

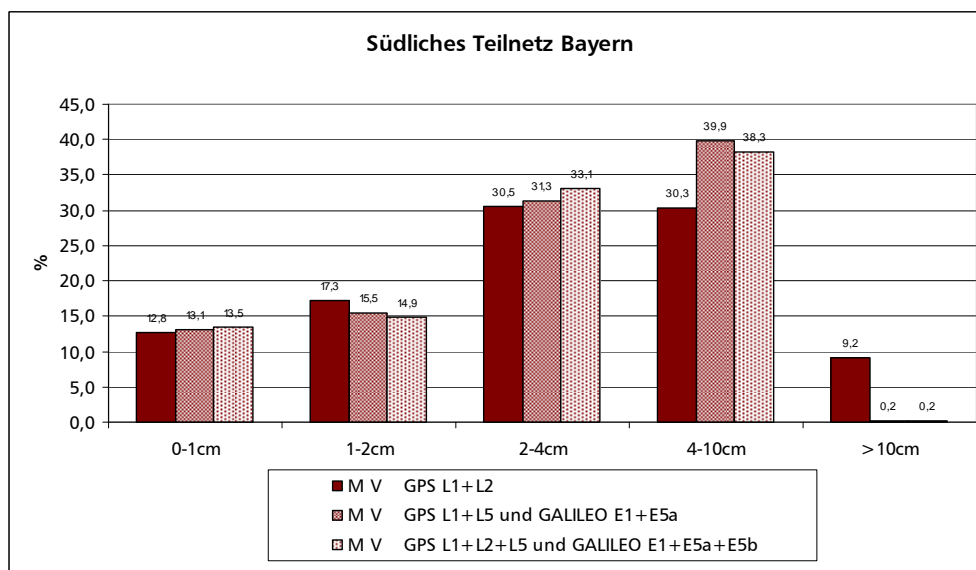


Abbildung 7-45: 3D-Positionsfehler für Szenario M V, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen

7.6 Weitere netzunabhängige Untersuchungen

7.6.1 Rover-Positionierung über mehrere Referenzstationen

Das klassische Prinzip der Rover-Positionierung in einem aktiven Referenznetzwerk – Nutzung von Flächenkorrekturparametern FKP oder einer virtuellen Referenzstation VRS – sieht die Anbindung an *eine* Referenzstation vor. Mit dem neueren Master-Auxiliary-Konzept MAC, s. Kapitel 4.2.2.2, werden jedoch die vollständigen Rohdaten

einer Referenzstation zusammen mit den Korrekptions- und Koordinatendifferenzen zwischen der Masterstation und weiteren Referenzstationen dem Nutzer (Rover) übermittelt, so dass diesem ermöglicht wird, die Rohdaten mehrerer Referenzstationen wiederherzustellen. Somit ist es möglich, den Rover auch durch Anbindung an mehrere Referenzstationen zu positionieren.

Diese Flexibilität bietet grundsätzlich auch das Modul SEMIKA. Dazu wurden exemplarisch im südlichen bayerischen Teilnetz (s. Abbildung 4-11) eine Positionierung der Rover-Station WEIL über die drei bzw. vier nächstgelegenen Referenzstationen durchgeführt. Es wurden synthetische GPS-Daten (L1/L2) für eine moderate ionosphärische Aktivität sowie ein troposphärisches Extremereignis über einen Zeitraum von fünf Stunden verwendet. Die Prozessierung erfolgte analog zu den in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Untersuchungen in 40sec-Intervallen.

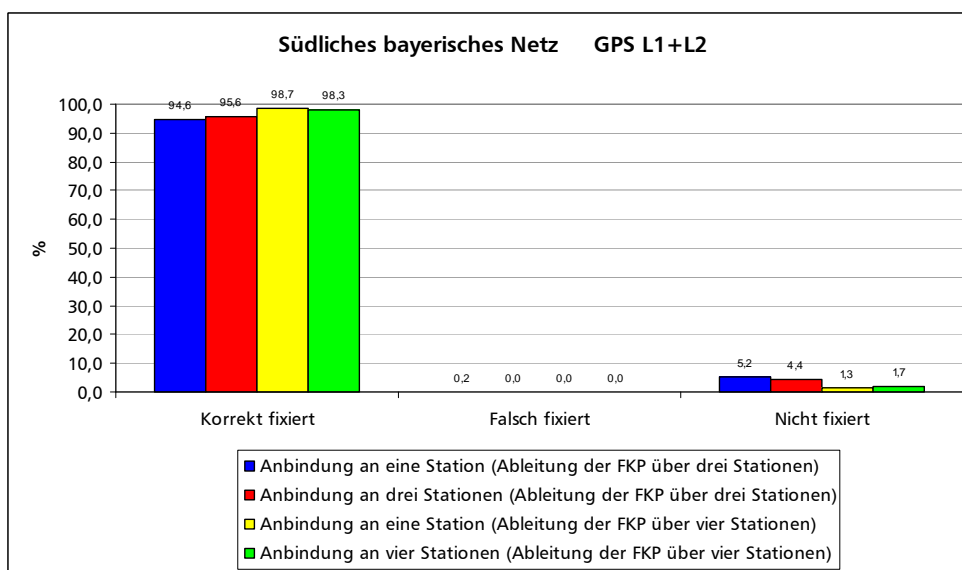


Abbildung 7-46: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar) bei Anbindung des Rover an eine/drei/vier Referenzstationen

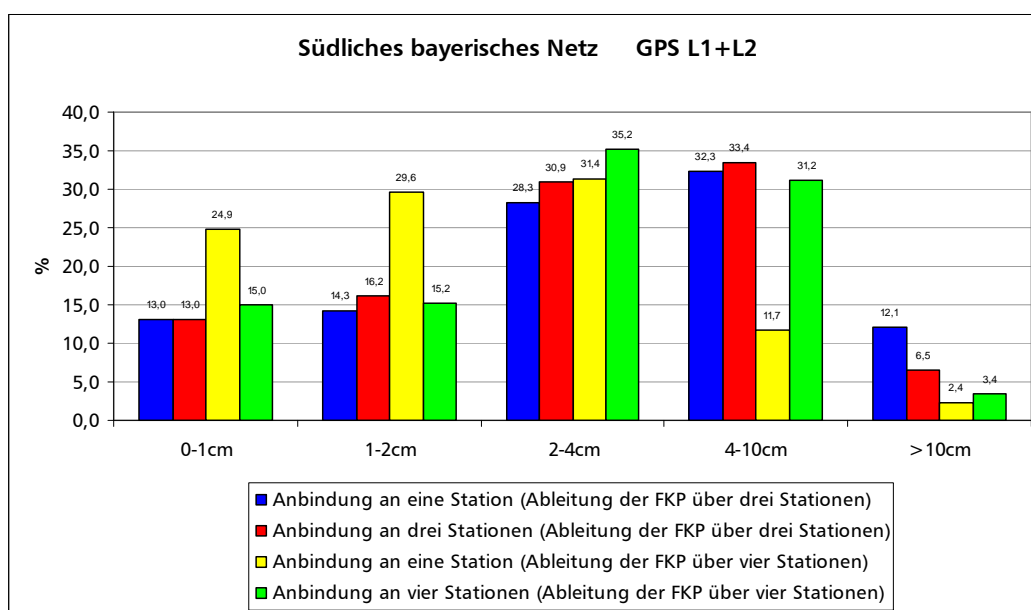


Abbildung 7-47: 3D-Positionsfehler bei Anbindung des Rover an eine/drei/vier Referenzstationen, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen

Die Mehrdeutigkeitsfixierungsstatistik bzw. die Positionierungsgenauigkeit bei Anbindung des Rovers an drei bzw. vier und im Vergleich dazu an nur eine Referenzstation ist in Abbildung 7-46 bzw. Abbildung 7-47 dargestellt. Hierbei können keine signifikanten Unterschiede in der Rate der korrekt fixierten Mehrdeutigkeiten festgestellt werden. Bzgl. der Positionierungsgenauigkeit erzielt man sogar bei der Nutzung von vier umliegenden Referenzstationen bei einer Anbindung an eine Referenzstation ein besseres Ergebnis als bei einer Anbindung an vier Referenzstationen; diese Feststellung kann man so jedoch nicht verallgemeinern.

In der Regel dürfte es demnach ausreichend sein, den Rover nur an eine Referenzstation anzubinden. Die Positionierungsgenauigkeit wird vor allem durch die Satellitengeometrie beeinflusst, die in einem aktiven Referenznetzwerk mit Stationsabständen von ca. 50-200 km auf allen sich in der Nähe des Rover befindlichen Referenzstationen sehr ähnlich ist.

Allerdings kann die Anbindung an mehrere Referenzstationen sinnvoll sein, wenn z.B. mit Datenlücken auf einer der Referenzstationen zu rechnen ist oder es bekannt ist, dass eine Referenzstation Daten schlechterer Qualität liefert (da z.B. temporär sich Hindernisse in der Nähe dieser Referenzstation befinden, die vermehrt Abschattungen und/oder Mehrwegeeffekte verursachen).

7.6.2 Echte kinematische Prozessierung

Der „normale“ *SAPOS*[®]-Nutzer (Katasteranwendungen u.ä.) zählt eher zu den statischen bzw. semi-kinematischen Nutzern. Im Gegensatz dazu sind z.B. Nutzer der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung voll-kinematische Nutzer, d.h. von Beobachtungsepoche zu Beobachtungsepoche (i.d.R. 1 Sekunde) verändert sich seine Position.

Um die in dieser Arbeit entwickelten Algorithmen auch mit voll-kinematischen Daten zu testen, werden an dieser Stelle im Gegensatz zu den Untersuchungen in Kapitel 7.3.5 Ergebnisse mit entsprechenden kinematischen Daten vorgestellt.

Hierzu wurden synthetische Daten entlang eines ca. 1,5 km langen Tracks, wie er in Abbildung 7-48 dargestellt ist, auf dem Gebiet der Universität der Bundeswehr München erzeugt. Der Rover bewegt sich entlang dieses Tracks mit einer durchschnittlichen Fußgängergeschwindigkeit. Des Weiteren wurden moderate ionosphärische Verhältnisse sowie ein troposphärisches Extremereignis simuliert.

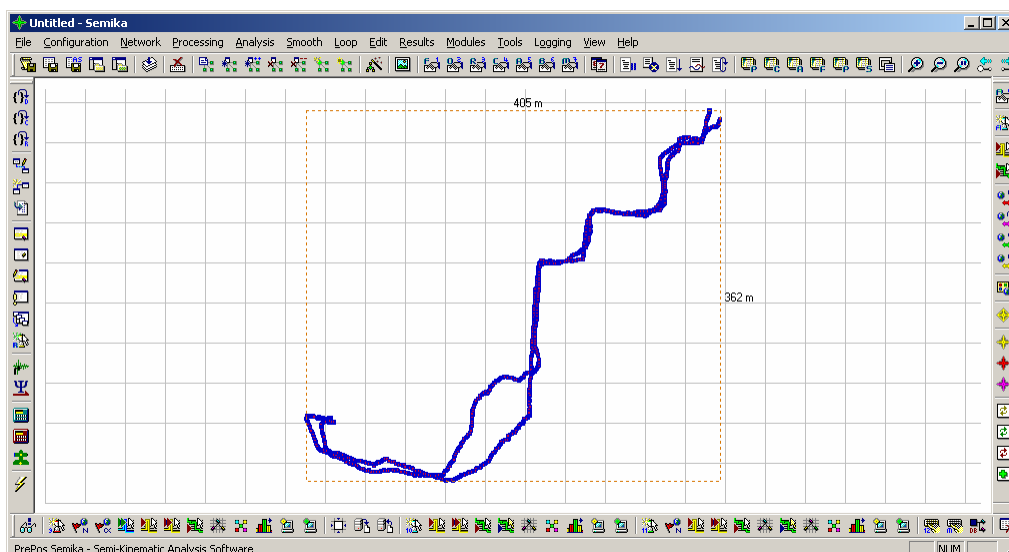


Abbildung 7-48: Track für echte kinematische Prozessierung

Die Positionierung des Rovers KUPP, der sich in der SAPOS[®]-Dreiecksmasche MUEN-TOLZ-ROSE befindet, erfolgt an die nächstgelegene Referenzstation MUEN. Es wurden Zwei-Frequenz-Messungen von GPS (*L1/L5*) und GALILEO (*E1/E5a*) herangezogen.

Es wurde auch hier versucht, jeweils über ein Zeitintervall von 40 sec die Mehrdeutigkeiten zu lösen; dies gelang in 100% der Fälle korrekt. Der mittlere dreidimensionale Positionsfehler für diesen 1120 sec langen Track beträgt 1,5 cm. In Abbildung 7-49 ist der dreidimensionale Positionsfehler über die Zeit aufgetragen.

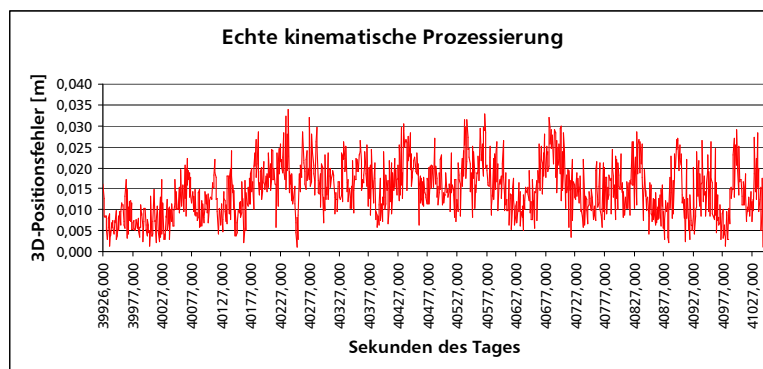


Abbildung 7-49: Dreidimensionaler Positionsfehler bei der echten kinematischen Prozessierung

Dieses kleine Experiment zur Positionierung eines sich kontinuierlich bewegenden Rovers unter Zuhilfenahme von Flächenkorrekturparametern sollte zeigen, dass prinzipiell auch die echte kinematische Prozessierung mit der hier entwickelten und vorgestellten Software funktioniert. Auf weitere Experimente – stärkere Ionosphärenverhältnisse oder eine größere Dynamik des Rovers – wird hier verzichtet.

7.6.3 Ionosphärenstörungen in Form von kürzeren MSTID's

Die in den vorangegangenen Kapiteln simulierten ionosphärischen Störungen in Form von MSTID's wiesen alle eine Geschwindigkeit von 180 km/h und eine Dauer von 45 min auf. Zusätzlich zu diesen Szenarien wurde hier noch die Positionierungsperformance bei ionosphärischen Störungen, die eine Zwischenstufe von medium und small scale TID's aufweisen, untersucht. Hierzu wurde eine Geschwindigkeit der TID's von 130 km/h, eine Dauer von 20 min sowie eine Amplitude von 3,0 TEC angenommen. Zusätzlich wurde eine plötzliche Zu-/Abnahme der ionosphärischen Laufzeitverzögerung von 1,5 m innerhalb von 15 min simuliert. Die Troposphäre repräsentiert hingegen moderate Verhältnisse: eine mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h vorbeiziehende Wetterfront verursacht innerhalb von 50 min eine Zu-/Abnahme der troposphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung von 1 cm.

Die Untersuchungen wurden wiederum für eine Basislinienlänge von 95 km (Netzkonfiguration s. Abbildung 7-25) durchgeführt. Die Ergebnisse zur Mehrdeutigkeitsfixierungsstatistik sowie zur Positionsgenauigkeit sind Abbildung 7-50 sowie Abbildung 7-51 zu entnehmen.

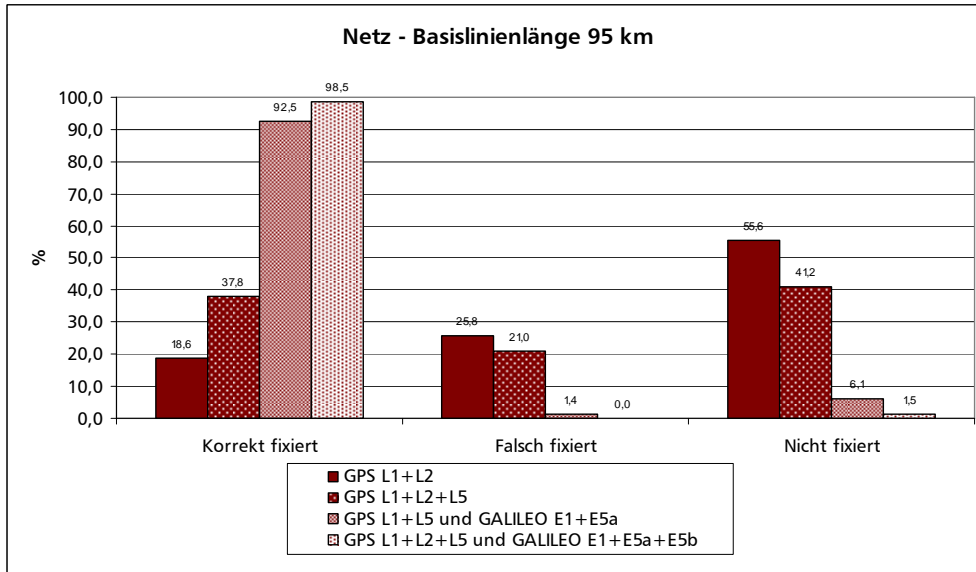


Abbildung 7-50: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / nicht fixierbar) unter Verwendung von kleinskaligeren TID's

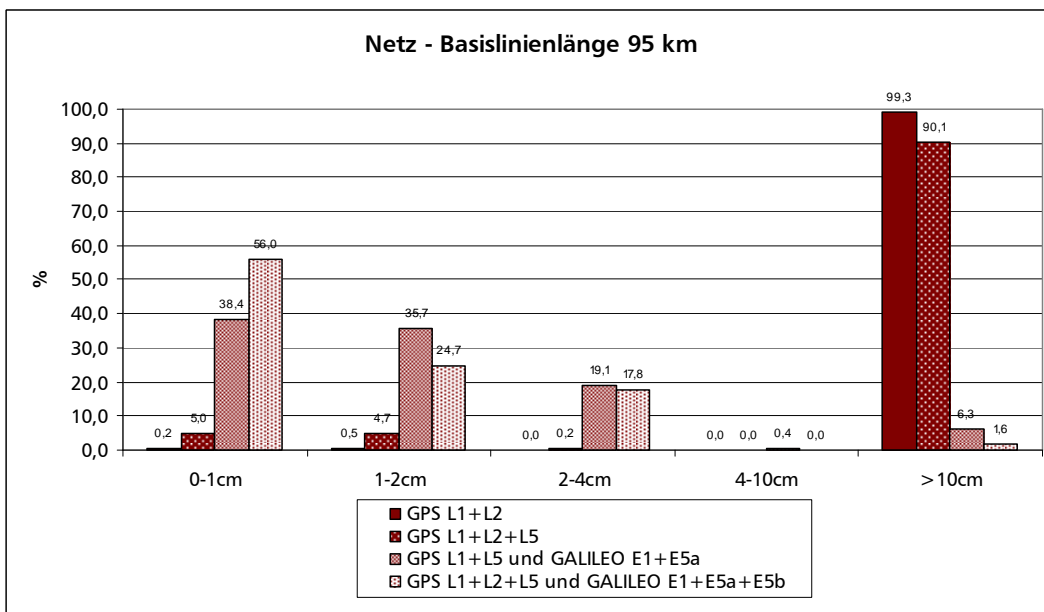


Abbildung 7-51: Dreidimensionaler Positionsfehler unter Verwendung von kleinskaligeren TID's

Hierbei zeigt sich, dass bei den hier simulierten kleinskaligeren TID's im Vergleich zu Szenario M V die Nutzung von nur GPS – mit zwei oder drei Frequenzen – eine noch geringere Rate an korrekt fixierten Mehrdeutigkeiten zur Folge hat (s. dazu im Vergleich Abbildung 7-26). Die Hinzunahme von GALILEO-Daten lassen jedoch die Rate der korrekt fixierten Mehrdeutigkeiten bei Nutzung von 2 Frequenzen (GPS L1/L5 und GALILEO E1/E5a) auf über 90% ansteigen, bei Nutzung von drei Frequenzen (GPS L1/L2/L5 und GALILEO E1/E5a/E5b) sogar auf nahezu 100%.

Im Vergleich zu den mittelskaligen TID's lässt sich hier jedoch noch eine Genauigkeitssteigerung durch die Hinzunahme einer dritten Frequenz (für GPS und GALILEO) erzielen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungsergebnisse dokumentieren, dass die Kombination von GPS und GALILEO unter gleichzeitiger Nutzung aktiver Referenzstationsnetze eine erhebliche Leistungssteigerung bewirkt. Die wesentlichen Erkenntnisse können folgendermaßen zusammengefasst werden:

Ausdünnung des Referenznetzwerks:

Eine Ausdünnung des SAPOS[®]-Referenzstationsnetzes erscheint – bei gleichzeitiger Verbesserung der Algorithmen zur Rover-Positionierung – möglich, und zwar ohne Verlust an Leistungsfähigkeit im Vergleich zum gegenwärtigen Stand. Auf Grundlage der durchgeführten Analysen wird eine Entfernung zwischen den Referenzstationen von ca. 100 km als unproblematisch angesehen. Bei diesen Entfernungen kann über den Status Quo hinaus in Zukunft auch bei kombinierter GPS+GALILEO Positionierung sogar mit einer weiteren Gesamtleistungssteigerung gerechnet werden. Eine Entfernung von 200 km wird als Grenzwert für sinnvolle Stationsabstände betrachtet. Da auch bei Ausfall einzelner Stationen die Funktionsfähigkeit von SAPOS[®] im Wesentlichen erhalten bleiben soll, kann erstgenannte Entfernung von 100 km als generelle Empfehlung angesehen werden. Die kombinierte Nutzung von GPS und GALILEO wird in solchen Netzen trotz Ausdünnung zu einer Leistungssteigerung im Vergleich zu gegenwärtigen (d.h. üblicherweise deutlich dichteren) GPS-Netzen führen. Aber auch die Verwendung von Stationsabständen von bis zu 200 km führte mit einer Erfolgsrate von 97% für die korrekte Fixierung der Mehrdeutigkeiten bei einer Beobachtungsdauer von 40 sec selbst bei vergleichsweise starker Ionosphärenaktivität zu guten Ergebnissen, wengleich die Rate im dichteren 100 km-Netz noch um 2% höher liegt. Die Entfernung von 200 km soll deshalb den Grenzwert für sinnvolle Stationsabstände darstellen.

Bei einer idealen Stationsanordnung in Form gleichseitiger Dreiecke (Fläche jeweils 4330 km²) ergäbe sich damit für die Gesamtfläche der Bundesrepublik Deutschland eine Anzahl von aufgerundet 83 Dreieckselementen und somit 85 Referenzstationen. Dies entspräche rein rechnerisch ein Verhältnis von 13,4 zwischen der Anzahl der nötigen Referenzstationen bei konventioneller RTK-Positionierung (ca. 10 km, siehe Kapitel 1). Diese Verhältniszahl nähert sich recht gut derjenigen des bereits vorgestellten finnischen Referenznetzes an. Da in der Realität keine ideale Anordnung der Referenzstationen erzielt werden kann, kann als Zielwert ein Faktor von 10 bis 12 empfohlen werden.

Ein Blick auf die aktuelle Dichte an Referenzstationen zeigt bei vielen Bundesländern in diesem Hinblick Ausdünnungspotenziale. Dem SAPOS[®]-Teilnetz in Bayern (Gesamtfläche: 70.552 km²) kommt im Hinblick auf die zukünftigen Erfordernisse bzgl. Dichte und Verteilung der Referenzstationen eine gewisse Vorbildfunktion zu, doch könnte selbst hier noch eine signifikante Ausdünnung vorgenommen werden. Die Verhältniszahl liegt in Bayern gegenwärtig bei 6,4 und damit immerhin deutlich über dem Durchschnittswert für Gesamtdeutschland (35 Referenzstationen; keine Hinzunahme von Stationen der angrenzenden Nachbarländer). Eine erhebliche Ausdünnung könnte bspw. in Thüringen vorgenommen werden (gegenwärtiger Faktor von lediglich 3,2).

Beispiele anderer europäischer Länder zeigen, dass RTK-Dienste auch heute bereits mit größeren Stationsabständen operieren können.

GPS+GALILEO Empfänger:

Bei Verwendung geometrie-basierter Methoden der Mehrdeutigkeitsfixierung konnte gezeigt werden, dass bereits die Nutzung von 2-Frequenz GPS-GALILEO-Empfängern zu einer erheblichen Leistungssteigerung führt, wohingegen die Hinzunahme von drei oder mehr Signalen keinen enormen Leistungsschub bei der Erfolgsstatistik der Mehrdeutigkeitsfixierung bewirkt. Die jedoch zweifelsohne vorhandene Leistungssteigerung macht sich aber gerade bei sehr stark ausgedünnten Netzen positiv bemerkbar (Beispiel: eine Rate von korrekt fixierten Mehrdeutigkeiten von 78% bei Nutzung von 2 Frequenzen im Vergleich zu 90% bei Nutzung von 3 Frequenzen). In jedem Fall kann festgehalten werden, dass ein kombinierter GPS-GALILEO 2-Frequenz-Empfänger stets einem nur-GPS 3-Frequenzempfänger (oder umgekehrt) vorgezogen werden sollte, da die Hinzunahme einer zweiten globalen Satellitenkonstellation offenkundig von größerem Wert ist als die Verwendung zusätzlicher Signale.

Eine ähnliche Feststellung kann bzgl. der in GNSS-Referenznetzwerken eingesetzten Empfänger getroffen werden. Bei Verwendung geeigneter Korrekturansätze können jene auch in Zukunft aus 2-Frequenz-Systemen bestehen, da dies zur wirksamen Bestimmung der Atmosphärenfehler bereits ausreicht. So können Referenzstationsbetreiber Kosten einsparen, ohne die Nutzung von mehr als zwei Frequenzen durch den Rover einzuschränken. Besonders offenkundig liegt dies beim VRS-Ansatz auf der Hand, da die quasi-synthetischen VRS-Daten bei Kenntnis der Ionosphärengrößen ohne Probleme auf jeder beliebigen Frequenz erzeugt werden können.

Rover-Algorithmik:

Die Ausdünnung der Referenznetzwerke hat unweigerlich einen Genauigkeitsverlust bei den Flächenkorrekturparametern zur Folge. Bei Verwendung der ANSA-Methode zur Mehrdeutigkeitsbestimmung konnte jedoch gezeigt werden, dass dieser Nachteil durch eine verbesserte Rover-Algorithmik weitgehend kompensiert werden kann, d.h. ionosphärische und troposphärische Restfehler werden mitgeschätzt. Gerade bei quasi-statischen oder nur schwach kinematischen Anwendungen – wie sie typisch für die Mehrzahl der SAPOS[®]-Nutzer sind – machen sich die Vorteile der Mitschätzung atmosphärischer Zustandsgrößen deutlich bemerkbar. Trotzdem bleibt die Verwendung aktiver Referenznetzwerke, d.h. die Nutzung der aus GNSS-Stationsmessungen interpolierten Atmosphärenkorrekturen, grundsätzlich ein sinnvolles Vorgehen: Auch wenn die Netzwerke ausgedünnt und damit die Interpolationsfehler vergrößert werden, so bleiben diese Korrekturdaten doch von einer vergleichsweise hohen Genauigkeit im Vergleich zu alternativen Quellen. Dies führt zu einer schnelleren Konvergenz der atmosphärischen Zustandsgrößen im Filter und dient damit der schnellen Mehrdeutigkeitsfixierung.

Die vorgestellten Ergebnisse dokumentieren, wie einige der Verbesserungen im Bereich der Satellitennavigation, insbesondere durch den Aufbau des GALILEO-Systems, in Vorteile bei der schnellen präzisen GNSS-Positionierung umgesetzt werden können. Gleichzeitig bleiben aber noch verschiedene weitere Forschungsfelder, die zu weiteren Verbesserungen führen können:

- 1.) Verbesserungen bei den Korrekturmodellen auf der Seite des Referenznetzwerkes sind denkbar. So könnte bspw. ein tomographisches Modell der Ionosphäre eine Alternative zu den hier verwendeten Ansätzen darstellen. Ein ähnliches Vorgehen bzgl. der Troposphäre ist schwieriger, jedoch bei Nutzung meteorologischer Randdaten

bzw. bei gleichzeitiger Nutzung numerischer Wettermodelle ebenfalls denkbar.

- 2.) Im Rahmen dieser Arbeit wurden lediglich GPS und GALILEO berücksichtigt. In zukünftigen Arbeiten könnte der Nutzwert von GLONASS, der hier aufgrund der zur Bearbeitungszeit geltenden Verfügbarkeitszahlen als gering eingeschätzt wurde, kritisch untersucht werden. Weiterhin könnte mit dem chinesischen COMPASS-System ein zusätzliches GNSS dem Nutzer zur Verfügung stehen.

9 Literaturverzeichnis

AHN, Y.W., D. KIM, P. DARE [2006]: *Local Tropospheric Anomaly Effects on GPS RTK Performance*; Proceedings of ION GNSS 2006, 26.-29. September 2006, Fort Worth, TX, S. 1925-1935.

ASKNE, J., H. NORDIUS [1987]: *Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data*; Radio Science, Vol. 22, No. 3, S. 379-386, Mai/Juni 1987.

AVILA-RODRIGUEZ, J.A., G.W. HEIN, M. IRSIGLER, 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.

BAGGE, A. [2001]: *DGPS-Datenformate 2.0*; Geo++ GmbH, Garbsen; WWW: <http://www.geopp.de/download/DGPS-datenformate2.pdf?PHPSESSID=61d5f6414c58910e837197f42eafb517>.

BALKENHOL, G., K. HEINZ [2006]: *GPSNet-Webserver Version 2.4 – Interpretation des I95 Index sowie der ionosphärischen und der geometrischen Modellrestfehler*; Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, FB SAPOS; WWW: http://www.lverma.nrw.de/produkte/raumbezug/sapos/neues/images/GPSnet_Modellrestfehler.pdf.

BARTENEV, V.A., V.E. KOSENKO, V.E. CHEBOTAREV [2006]: *Russian GLONASS at the Stage of Active Implementation*; Inside GNSS - Engineering Solutions for the Global Satellite Navigation Community, Vol. 1, No. 3, S. 40-43, Gibbons Media & Research, April 2006.

BAUER, M. [2003]: *Vermessung und Ortung mit Satelliten – GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme*; 5. Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg, 2003; ISBN 3-87907-360-0.

BENEDICTO, J., S. E. DINWIDDY, G. GATTI, R. LUCAS, M. LUGERT [2000]: *GALILEO: Satellite Design and Technology Developments*; European Space Agency, Noordwijk, November 2000; WWW: http://esamultimedia.esa.int/docs/galileo_world_paper_Dec_2000.pdf.

BENNING, W. [2002]: *Statistik in Geodäsie, Geoinformation und Bauwesen*; Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg, 2002; ISBN 3-87907-383-X.

BEVIS, M., S. BUSINGER, S.R. CHRISWELL, T.A. HERRING, R.A. ANTHES, C.R. ROCKEN, R.H. WARE [1994]: *GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water*; Journal of Applied Meteorology, Vol. 33, S. 379-386, March 1994.

BROWN, N., R. KEENAN, B. RICHTER, L. TROYER [2005]: *Advances in ambiguity resolution for RTK applications using the new RTCM V3.0 Master-Auxiliary messages*; Proceedings of ION GNSS 2005, 13.-16. September 2005, Long Beach, CA, S. 73-80; WWW: http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/support/lgs_page_catalog.htm?cid=5272.

CRANE, R. [2007]: *U.S. Space-Based Positioning, Navigation and Timing Policy and Program Update*; Vortrag auf The Third Annual European Defence Geospatial Intelligence Conference (DGI 2007), 24. Januar 2007, London; WWW: <http://pnt.gov/public/2007-01-DGI/crane.ppt>.

CREEL, T., A.J. DORSEY, P.J. MENDICKI, J. LITTLE, R.G. MACH, B.A. RENFRO [2006]: *New, Improved GPS – The Legacy Accuracy Improvement Initiative*; GPS World, Vol. 16, No. 3, S. 20-31, Advanstar Communications, März 2006; WWW: <http://www.gpsworld.com/gpsworld/data/articlestandard/gpsworld/082006/308999/article.pdf>.

CREWS, MARK [2007]: *GPS Wing Program Update*; Vortrag auf dem Munich Satellite Navigation Summit 2007, 6.-8. März 2007, München.

DACH, R., U. HUGENTOBLE, P. FRIDEZ, M. MEINDL [2007]: *Documentation of Bernese GPS Software Version 5.0*; User Manual, Astronomisches Institut, Universität Bern, Schweiz, Januar 2007; WWW: <http://www.bernese.unibe.ch/docs/DOCU50.pdf>.

DAI, L., S. HAN, J. WANG, C. RIZOS [2003]: *Comparison of Interpolation Algorithms in Network-Based GPS Techniques*; Navigation: Journal of The Institute of Navigation, Vol. 50, No. 4, S. 277-293, Winter 2003-2004.

DAVIS, J. L., T.A. HERRING, I.I. SHAPIRO, A.E.E. ROGERS, G. ELGERED [1985]: *Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length*; Radio Science, Vol. 20, No. 6, S. 1593-1607, Nov./Dez. 1985.

DEHEL, T., F. LORGE, J. WARBURTON, D. NELTHROPP [2004]: *Satellite Navigation vs. the Ionosphere: Where Are We, and Where Are We Going?*; Proceedings of ION GNSS 2004, 21.-24. September 2004, Long Beach, CA, S. 375-386.

DETTMERING, D. [2003]: *DGNSS über Internet und Mobilfunk: Der EUREF Ntrip-Broadcaster*; Vortrag auf dem 5. SAPOS-Symposium, Frankfurt a.M., S. 72-78; WWW: http://www.sapos.de/pdf/5symposium/72-78_dettmering.pdf.

EISSFELLER, B., M. IRSIGLER, J.-A. AVILA-RODRIGUEZ, E. SCHÜLER, T. SCHÜLER [2007a]: *Das europäische Satellitennavigationssystem GALILEO – Entwicklungsstand*; Allgemeine Vermessungsnachrichten AVN, 2/2007, S. 42-55, Februar 2007, Wißner-Verlag, Heidelberg.

EISSFELLER, B., G. AMERES, V. KROPP, D. SANROMA [2007b]: *Performance of GPS, GLONASS and Galileo*; Beitrag zur 51. Photogrammetrischen Woche, 3.-7. September 2007, Stuttgart; WWW: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo07/220Eissfeller.pdf>.

EULER, H.-J., H. LANDAU [1992]: *Fast Ambiguity Resolution On-The-Fly for Real-Time Applications*; Proceedings of the 6th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Columbus, OH, März 1992.

FENG, Y. [2004]: *A Completed Geometry-Free Approach to Three Carrier Ambiguity Resolutions*; GNSS 2004, 6.-8. Dezember 2004, Sydney, Australien; WWW: <http://www.gmat.unsw.edu.au/gnss2004unsw/FENG,%20Yanming%20P18.pdf>.

FLIEGEL, H.F., T.E. GALLINI, E.R. SWIFT [1992]: *Global Positioning System Radiation Force Model for Geodetic Applications*; Journal of Geophysical Research, Vol. 97, No. B1, S. 559-568, Januar 1992.

FÖRSTER, M., N. JAKOWSKI [2000]: *Geomagnetic Storm Effects on the Topside Ionosphere and Plasmasphere: A Compact Tutorial and New Results*; Surveys in Geophysics, Vol. 21, No. 1, S. 47-87, Springer Netherlands, Januar 2000; WWW: <http://www.springerlink.com/content/tjj0815x47r34765/fulltext.pdf>.

FONTANA, R.D., W. CHEUNG, P.M. NOVAK, T.A. STANSELL [2001]: *The New L2 Civil Signal*; Proceedings of ION GPS 2001, 11.-14. September 2001, Salt Lake City, UT, S. 617-631; WWW: <http://www.navcen.uscg.gov/gps/modernization/TheNewL2CivilSignal.pdf>.

FORTES, L.P., M.E. CANNON, G. LACHAPELLE, S. SKONE [2003]: *Optimizing a network-based RTK method for OTF positioning*; GPS Solutions Vol. 7, No. 3, S. 61-73, Springer Verlag Berlin/Heidelberg, August 2003.

FOTOPOULOS, G., M.E. CANNON [2001]: *An Overview of Multi-Reference Station methods for cm-Level Positioning*; GPS Solutions, Vol. 4, No. 3, S. 1-10, Springer Verlag Berlin/Heidelberg, Januar 2001.

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>.

GALILEO [2004b]: *GALILEO Signals: RF Characteristics*; Standardisation Document of Navigation Systems Panel (NSP), Montreal, Kanada, 12.-22. Oktober 2004; WWW: <http://www.galileoju.com/doc/Navigation%20System%20Panel%20NSP%20Galileo%20Signals%20RF%20Characteristics.pdf>.

GEBHARD, H. [2003]: *Nutzung der Internet-Radio-Technologie zur Übertragung von GNSS-Daten*; Vortrag auf dem 5. SAPOS-Symposium, Frankfurt a.M., S. 67-71; WWW: http://www.sapos.de/pdf/5symposium/67-71_gebhard.pdf.

GIBBONS, G. [2006]: *GNSS Trilogy: Our Story Thus Far*; Inside GNSS – Engineering Solutions for the Global Navigation Satellite System Community, Vol. 1, No.1, S. 25-31+67, Gibbons Media & Research, Jan./Feb. 2006.

GREGORIUS, T., G. BLEWITT [1998]: *The Effect of Weather Fronts on GPS Measurements*; GPS World, Vol. 9, No. 5, S. 52-60, Advanstar Communications, Mai 1998.

HAN, S., C. RIZOS [1999]: *The Impact of Two Additional Civilian GPS Frequencies on Ambiguity Resolution Strategies*; Proceedings of ION Annual Technical Meeting, 28.-30. Juni 1999, Cambridge, MA, S. 315-321.

HANSEN [1998]: *Atmospheric Heterogeneities in ERS Tandem SAR Interferometry, Chapter 2*; DEOS Report No. 98.1, S. 8-24, Delft University Press.

HATCH, R., H.-J. EULER [1994]: *Comparison of Several AROF Kinematic Techniques*; Proceedings of ION GPS-94, 20.-23. September 1994, Salt Lake City, UT, S. 363-370.

HATCH, R., J. JUNG, P. ENGE, B. PERVAN [2000]: *Civilian GPS: The Benefits of Three Frequencies*; GPS Solutions Vol. 3, No. 4, S. 1-9, Springer Verlag Berlin/Heidelberg, April 2000.

HAY, C. [2000]: *The GPS Accuracy Improvement Initiative*; GPS World, Vol. 11, No. 6, S. 56-61, Advanstar Communications, Juni 2000.

HEIN, G.W., J.-A. AVILA-RODRIGUEZ, S. WALLNER, J.W. BETZ, C.J. HEGARTY, J.J. RUSHANAN, A.L. KRAAY, A.R. PRATT, S. LENAHAN, J. OWEN, J.-L. ISSLER, T.A. STANSELL [2006]: *MBOC: The New Optimized Spreading Modulation – Recommended for Galileo L1 OS and GPS L1C*; Inside GNSS – Engineering Solutions for the Global Navigation Satellite System Community, Vol. 1, No. 4, S. 57-65, Gibbons Media & Research, Mai/Juni 2006; WWW: <http://forschung.unibw.de/papers/rhzcd476ayowndss79v733q9ijhrqg.pdf>.

HERNÁNDEZ-PAJARES ET AL. [2006a]: *WARTK based on EGNOS and GALILEO: Technical Feasibility Study – Final Report*; interner Bericht am Institut für Erdmessung und Navigation, Universität der Bundeswehr München, nicht veröffentlicht.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M., J.M. JUAN, J. SANZ [2006b]: *Real Time MSTIDs Modelling and Application to Improve the Precise GPS and GALILEO Navigation*; Proceedings of ION GNSS 2006, 26.-29. September 2006, Fort Worth, TX, S. 1358-1368.

HUANG, J., F. VAN GRAAS [2006]: *Comparison of Tropospheric Decorrelation Errors in the Presence of Severe Weather Conditions in Different Areas and Over Different Baseline Lengths*; Proceedings of ION GNSS 2006, 26.-29. September 2006, Fort Worth, TX, S. 2769-2787.

ICD-GPS-200C [1997]: *NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Interfaces*; U.S. Air Force 1997; WWW: <http://www.navcen.uscg.gov/pubs>.

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.

JÄGER, R., T. MÜLLER, H. SALER, R. SCHWÄBLE [2005]: *Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren – Ein Leitfaden für Ausbildung und Praxis von Geodäten und Geoinformatikern*; Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2005; ISBN 3-87907-370-8.

JI, S., W. CHEN, C. ZHAO, X. DING, Y. CHEN [2006]: *Investigation of Ambiguity Resolution Performance of Short-, Medium- and Long-distance Baselines Based on Four Galileo Frequencies*; Proceedings of ION GNSS 2006, 26.-29. September 2006, Fort Worth, TX, S. 317-326.

DE JONG, K. [1999]: *The Influence of Code Multipath on the Estimated Parameters of the Geometry-Free GPS Model*; GPS Solutions, Vol. 3, No. 2, S. 11-18, John Wiley & Sons, Oktober 1999.

DEJONGE, P.J., P.J.G. TEUNISSEN, N.F. JONKMAN, P. JOOSTEN [2000]: *The distributional dependence of the range on triple frequency GPS ambiguity resolution*; Proceedings of ION National Technical Meeting 2000, 26.-28. Januar 2000, Anaheim, CA, S. 605-612.

JONKMAN, N.F. [1998]: *The Geometry-Free Approach to Integer GPS Ambiguity Estimation*; Proceedings of ION GPS-98, 15.-18. September 2004, Nashville, TN, S. 369-379.

JONSSON, B., G. HEDLING, L. JÄMTNÄS, P. WIKLUND [2006]: *SWEPOS Positioning Services – Status, Applications and Experiences*; TS 3 – Forum for providers and users of Real Time correction Services from Continuously Operating Reference Stations (CORS), XXIII FIG Congress, 8.-13. Oktober 2006, München; WWW: http://www.fig.net/pub/fig2006/papers/ts03/ts03_01_jonsson_etal_%200626.pdf.

KALAFUS, R.M., K. VAN DIERENDONCK [2003]: *The New RTCM SC-104 Standard for Differential and RTK GNSS Broadcasts*; Proceedings of ION GPS/GNSS 2003, 9.-12. September 2003, Portland, OR, S. 741-747.

KERTZ, W. [1971]: *Einführung in die Geophysik, Band 2 - Obere Atmosphäre und Magnetosphäre*; Bibliographisches Institut, Mannheim/Wien/Zürich, Hochschultaschenbücher-Verlag, Mannheim 1971.

KIM, D., L. SERRANO, R. LANGLEY [2006]: *Phase Wind-Up Analysis*; GPS World, Vol. 17, No. 9, S. 58-64, Advanstar Communications, September 2006.

KING, R. [2000]: *SVNAV.DAT – Satellite Information Table of GAMIT/GLOBK (GAMIT Release 10.0, Dezember 2000)*; MIT, USA.

KLOBUCHAR, J.A. [1996]: *Ionospheric Effects on GPS*; in: SPILKER, J.J., B.W. PARKINSON: *GPS Theory and Applications*; Vol. I, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 163, 1996.

KOUBA, J., P. HÉROUX [2001]: *Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products*; GPS Solutions, Vol. 5, No. 2, S. 12-28, John Wiley & Sons, Oktober 2001.

KRUEGER, E., T. SCHÜLER, G.W. HEIN, A. MARTELLUCCI, G. BLARZINO [2004]: *Galileo Tropospheric Correction Approaches developed within GSTB-VI*; GNSS 2004 – European Navigation Conference, 17.-19. Mai 2004, Rotterdam, Niederlande; WWW: <http://forschung.unibw.de/papers/11i3llunkzpngxhfxagnqvlvoxxkkw.pdf>.

LEICK, A. [1995]: *GPS Satellite Surveying*; 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1995; ISBN 0-471-30626-6.

LEINEN, S. [1997]: *Hochpräzise Positionierung über große Entfernungen und in Echtzeit mit dem Global Positioning System*; Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 472; ISBN 3-7696-9512-7.

LUO, M., S. PULLEN, S. DATTA-BARUA, G. ZHANG, T. QALTER, P. ENGE [2005]: *LAAS Study of Slow-Moving Ionosphere Anomalies and Their Potential Impacts*; Proceedings of ION GNSS 2005, 13.-16. September 2005, Long Beach, CA, S. 2337-2349.

MADER, G.L. [1992]: *Rapid Static and Kinematic Global Positioning System Solutions Using the Ambiguity Function Technique*; Journal of Geophysical Research, Vol. 97, No. B3, S. 3271-3283, März 1992.

MALBERG, H. [2002]: *Meteorologie und Klimatologie – Eine Einführung*; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002, ISBN 3-540-42919-0.

MARINI, J.W. [1972]: *Correction of Satellite Tracking Data for an Arbitrary Tropospheric Profile*; Radio Science, Vol. 7, No. 2, S. 223-231, Februar 1972.

MISRA, P., P. ENGE [2001]: *Global Positioning System – Signals, Measurements, and Performance*; Ganga-Jamuna Press, Lincoln, MA; ISBN 0-9709544-0-9.

NEILAN, R. [2006]: *U.S. Space-Based Positioning, Navigation and Timing: A Status and Policy Review*; Vortrag auf GNSS Korea 2006, 18.-20. Oktober 2006, Jeju, Korea; WWW: <http://pnt.gov/public/2006-10-korea/neilan.ppt>.

NIELL, A.E. [1996]: *Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths*; Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No. B2, S. 3227-3246, 1996.

ODIJK, D. [2002]: *Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delays*; Dissertation, Department of Mathematical Geodesy and Positioning, Universität Delft, Niederlande, 2002; ISBN 90-80147-2-7.

ORÚS, R., M. HERNÁNDEZ-PAJARES, J.M. JUAN, J. SANZ [2003]: *Ionospheric effects on precise navigation at regional and continental scales over Europe*; International Workshop of Working Group I/5 – Theory, Technology and Realities of Inertial / GPS Sensor orientation – of ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), 22.-23. September 2003, Castelldefels, Spanien; WWW: http://www.isprs.org/commission1/theory_tech_realities/pdf/p24_s2.pdf.

OWENS, J.C. [1967]: *Optical Refractive Index of Air: Dependence on Pressure, Temperature and Composition*; Applied Optics, 6, S. 51-58, 1/1967.

PÍRIZ, R., B. MARTÍN-PEIRÓ, 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., J.I.R. OWEN, G.W. HEIN, J.A. AVILA-RODRIGUEZ [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., S.A. TEUKOLSKY, W.T. VETTERLING, B.P. FLANNERY [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.

RICHERT, T., N. EL-SHEIMY [2007]: *Optimal linear combinations of triple frequency carrier phase data from future global navigation*; GPS Solutions Vol. 11, No. 1, S. 11-19, Springer Verlag Berlin/Heidelberg, Januar 2007.

RHEINLAND-PFALZ [2003]: *Vorläufige Richtlinien für den Einsatz von SAPOS[®]-HEPS und SAPOS[®]-GPPS bei Liegenschaftsvermessungen*; Rundschreiben des Ministeriums des Innern und für Sport des Landes Rheinland-Pfalz vom 5. Juni 2003.

ROSSBACH, U. [2000]: *Positioning and Navigation Using the Russian Satellite System GLO-NASS*; Dissertation, Schriftenreihe Heft 70, Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, 2000; WWW: <http://137.193.200.177/ediss/rossbach-udo/meta.html>.

ROTHACHER, M. [1992]: *Orbits of satellite systems in space geodesy*; Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Publikationsreihe der Schweizerischen Geodätischen Kommission, Band 46, Zürich, Schweiz, 1992; WWW: <http://www.sgc.ethz.ch/sgc-volumes/sgk-46.pdf>.

SAASTAMOINEN, J. [1972]: *Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites*; in: HENRIKSEN, S.W. ET AL.: *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*; Geophysical Monograph Series, Vol. 15, S. 247-251, American Geophysical Union AGU, Washington, D.C., 1972.

SCHAER, S., W. GURTNER, J. FELTENS [1998]: *IONEX: The IONosphere Map Exchange Format Version 1*; Proceedings of the IGS Analysis Center Workshop, 9.-11- Februar 1998, ESA/ESOC, Darmstadt, Deutschland, S. 233-247; WWW: <ftp://igsdp.jpl.nasa.gov/igsdp/data/format/ionex1.ps>.

SCHÜLER, E., T. SCHÜLER [2005]: *GPS-Augmented Determination of k_3 Refraction Coefficient*; Proceedings of ESA Propagation Workshop, 23. November 2005, Noordwijk, Niederlande; WWW: <http://forschung.unibw.de/papers/pyi1hsmuupasm7tf6qbnwln01v4kh.pdf>.

SCHÜLER, T. [2001]: *On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation*; Dissertation, Schriftenreihe Heft 73, Studiengang Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr München, Februar 2001; WWW: <http://137.193.200.177/ediss/schueler-torben/inhalt.pdf>.

SCHÜLER, T., G.W. HEIN [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. [2006a]: *GNSS Meteorology on Moving Platforms*; Inside GNSS – Engineering Solutions for the Global Navigation Satellite System Community, Vol. 1, No.3, S. 20-23, Gibbons Media & Research, April 2006.

SCHÜLER, T. [2006b]: *Zum Stand der differentiellen kinematischen GPS-Positionierung*; Habilitationsschrift, Universität der Bundeswehr München, November 2006; WWW: <http://forschung.unibw.de/papers/teiauzbjnomvpjpvjsb7jfv68plhl.pdf>.

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.

SIMSKY, A., J.-M. SLEEWAEGEN, P. NEMRY [2006]: *Early performance results for new Galileo and GPS signals-in-space*; Proceedings of ENC GNSS 2006, 7.-10. Mai 2006, Manchester, UK; WWW: http://www.septentrio.com/papers/SimskySleewaegen_Nemry-NewSignalsENGSSNGG2006.pdf.

V. STORCH, H., S. GÜSS, M. HEIMANN [1999]: *Das Klimasystem und seine Modellierung – Eine Einführung*; Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1999, ISBN 3-540-65830-0.

SUTTON, E. [1997]: *Optimal Search Space Identification for Instantaneous Integer Cycle Ambiguity Resolution*; Proceedings of ION GPS-97, 16.-19. September 1997, Kansas City, MO, S. 313-322.

TEUNISSEN, P.J.G., P.J. DE JONGE, C.C.J.M. TIBERIUS [1995]: *A New Way to Fix Carrier-Phase Ambiguities*; GPS World, Vol. 6, No. 4, S. 58-61, Advanstar Communications, April 1995.

TEUNISSEN, P.J.G., D. ODIJK [1997]: *Ambiguity Dilution of Precision: Definition, Properties and Application*; Proceedings of ION GPS-97, 16.-19. September 1997, Kansas City, MO, S. 891-899 ; WWW: <http://enterprise.lr.tudelft.nl/publications/files/ion97adop.pdf>.

TEUNISSEN, P.J.G. [2003]: *A Carrier-Phase Ambiguity Estimator With Easy-to-Evaluate Fail-Rate*; Artificial Satellites, Vol. 38, No. 3, S. 89-96, 2003.

US-EC [2004]: *Agreement on the Promotion, Provision and Use of GALILEO and GPS Satellite-based Navigation Systems and Related Applications*; WWW: <http://pnt.gov/public/docs/2004-US-EC-agreement.pdf>.

US-EU [2006]: *WGA Signed Recommendation on MBOC*, 23. März 2006; WWW: <http://www.galileoju.com/doc/Navigation%20System%20Panel%20NSP%20Galileo%20Signals%20RF%20Characteristics.pdf>.

US-POLICY [2004]: *U.S. Space-Based Positioning, Navigation and Timing Policy – Fact Sheet*; WWW: <http://pnt.gov/policy/>.

VERHAGEN, S. [2004]: *Integer ambiguity validation: an open problem?*; GPS Solutions, Vol. 8, No. 1, S. 36-43, Springer Verlag Berlin/Heidelberg, April 2004; WWW: http://enterprise.lr.tudelft.nl/publications/files/GPSSolutions_81_Verhagen_AR.pdf.

WANNINGER, L. [1999]: *Der Einfluss ionosphärischer Störungen auf die präzise GPS-Positionierung mit Hilfe virtueller Referenzstationen*; Zeitschrift für Vermessungswesen zfv, 124. Jahrgang, Heft 10, S. 322-330, Konrad Wittwer Verlag Stuttgart, Oktober 1999.

WANNINGER, L. [2000]: *Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen*; Habilitationsschrift, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 508, München, 2000; WWW: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_geowissenschaften/gi/gg/veroeffentlichungen/habilwan.pdf.

WANNINGER, L. [2004]: *Ionospheric Disturbance Indices for RTK and Network RTK Positioning*; Proceedings of ION GNSS 2004, 21.-24. September 2004, Long Beach, CA, S. 2849-2854; WWW: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_geowissenschaften/gi/gg/veroeffentlichungen/ion04f64.pdf.

WANNINGER, L. [2006]: *Netz-RTK*; in: *GPS und Galileo – Methoden, Lösungen und neueste Entwicklungen*; 66. DVW-Seminar, Darmstadt, DVW-Schriftenreihe Band 49/2006, Wißner-Verlag Augsburg, S. 59-69, 2006; WWW: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_geowissenschaften/gi/gg/veroeffentlichungen/netzrtk_dvw4906.pdf.

WEBER, G., D. DETTMERING, H. GEBHARD, R. KALAFUS [2005]: *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip) – IP-Streaming for Real-Time GNSS Applications*; Proceedings of ION GNSS 2005, 13.-16. September 2005, Long Beach, CA, S. 2243-2247.

WEBER, T., H.L. TRAUTENBERG, C. SCHÄFER [2001]: *GALILEO System Architecture – Status and Concepts*; Proceedings of ION GPS 2001, 11.-14. September 2001, Salt Lake City, UT, S. 1264-1272.

WERNER, W. [1999]: *Entwicklung eines hochpräzisen DGPS-DGLONASS Navigationssystems unter besonderer Berücksichtigung von Pseudolites*; Dissertation, Schriftenreihe Heft 64, Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, 1999.

WILLGALIS, S. [2005]: *Beiträge zur präzisen Echtzeitpositionierung in GPS-Referenzstationsnetzen*; Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover Nr. 255, Hannover 2005, ISSN 0174-1454; WWW: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dh05/498020614.pdf>.

WÜBBENA, G. [1991]: *Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung*; Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 168, Hannover, 1991.

A Anhang zu Linearkombinationen

Im Folgenden finden sich Tabellen für Linearkombinationen aus zwei bzw. drei Signalen für ein modernisiertes GPS bzw. GALILEO.

Signal	a_1	a_2	λ_{LK} [mm]	$ V_{ION} $	$\frac{ION_{LK}[m]}{ION_{L1(L2)}[m]}$	$\sigma_{\phi,LK}$ [mm]	$\sigma_{\phi,LK}$ [cyc]
L₁	1	0	190	0,779	1,000	1,0	0,005
L₂	0	-1	244	1,283	1,647	1,0	0,004
L _N	1	-1	107	1,000	1,283	0,7	0,007
L _W	1	1	862	1,000	1,283	5,7	0,007
L _{2;1}	2	1	156	0,457	0,587	1,8	0,011
L _{3;2}	3	2	132	0,234	0,301	2,3	0,018
L _{4;3}	4	3	114	0,070	0,090	2,8	0,024
L _{5;4}	5	4	101	0,055	0,071	3,1	0,031
L _{9;7}	9	7	54	0,004	0,005	3,0	0,055
L _{77;60}	77	60	6	0,000	0,000	3,0	0,473
L _{60;77}	60	77	∞	∞	∞		
L _{7;9}	7	9	14653	273,0	350,4	763	0,052
L _{4;5}	4	5	1832	18,13	23,26	53,7	0,029
L _{3;4}	3	4	1628	14,22	18,25	37,0	0,023
L _{2;3}	2	3	564	4,269	5,479	9,1	0,016
L _{1;2}	1	2	341	2,186	2,805	3,3	0,010
L₁	1	0	190	0,747	1,000	1,0	0,005
L₅	0	-1	255	1,339	1,793	1,0	0,004
L _{"N"}	1	-1	109	1,000	1,339	0,7	0,007
L _{Med.}	1	1	751	1,000	1,339	4,9	0,007
L _{2;1}	2	1	152	0,394	0,527	1,7	0,011
L _{3;2}	3	2	126	0,159	0,214	2,2	0,018
L _{4;3}	4	3	108	0,007	0,010	2,6	0,024
L _{7;5}	7	5	58	0,070	0,093	2,4	0,042
L _{11;8}	11	8	38	0,043	0,057	2,5	0,066
L _{13;10}	13	10	34	0,053	0,071	2,7	0,079
L _{15;11}	15	11	28	0,030	0,040	2,5	0,090
L _{31;23}	31	23	14	0,011	0,014	2,6	0,186
L _{154;115}	154	115	3	0,000	0,000	2,6	0,927
L _{115;154}	115	154	∞	∞	∞		
L _{23;31}	23	31	1274	92,57	124,0	219	0,172
L _{11;15}	11	15	945	33,71	45,14	78,0	0,083
L _{10;13}	10	13	651	18,93	25,35	47,7	0,073
L _{8;11}	8	11	888	23,46	31,41	53,5	0,060
L _{5;7}	5	7	837	14,37	19,25	31,8	0,038
L _{3;4}	3	4	14652	135,5	181,5	326	0,022
L _{2;3}	2	3	792	6,270	8,397	12,5	0,016
L _{1;2}	1	2	386	2,539	3,401	3,6	0,009
L₂	1	0	244	0,958	1,000	1,0	0,004
L₅	0	-1	255	1,043	1,000	1,0	0,004

L ^{„N“}	1	-1	125	1,000	1,043	0,7	0,006
L _{XW}	1	1	5861	1,000	1,043	33,2	0,006
L _{2;1}	2	1	234	0,880	0,918	2,1	0,009
L _{24;23}	24	23	125	0,000	0,000	16,6	0,133
L _{23;24}	23	24	∞	∞	∞		
L _{1;2}	1	2	266	1,136	1,186	2,4	0,009

Tabelle A-1: Linearkombinationen aus zwei Signalen für GPS

Signal	a ₁	a ₂	λ _{LK} [mm]	V _{ION}	$\frac{ION_{LK}[m]}{ION_{L1(L2)}[m]}$	σ _{φ,LK} [mm]	σ _{φ,LK} [cyc]
L₁	1	0	190	0,812	1,000	1,0	0,005
E₆	0	-1	234	1,232	1,518	1,0	0,004
L ^{„N“}	1	-1	105	1,000	1,232	0,7	0,007
L ^{„W“}	1	1	1011	1,000	1,232	6,8	0,007
L _{2;1}	2	1	160	0,525	0,646	1,8	0,011
L _{3;2}	3	2	138	0,316	0,389	2,5	0,018
L _{5;4}	5	4	109	0,033	0,041	3,4	0,031
L _{11;9}	11	9	52	0,019	0,024	3,6	0,069
L _{16;13}	16	13	35	0,002	0,003	3,5	0,101
L _{154;125}	154	125	4	0,000	0,000	3,5	0,969
L _{125;154}	125	145	∞	∞	∞		
L _{13;16}	13	16	14652	419,5	516,8	1415	0,097
L _{9;11}	9	11	2664	51,73	63,73	178	0,067
L _{4;5}	4	5	3256	30,00	36,96	97,5	0,030
L _{2;3}	2	3	437	3,164	3,898	7,2	0,017
L _{1;2}	1	2	305	1,906	2,349	3,1	0,010
L₁	1	0	190	0,766	1,000	1,0	0,005
E_{5b}	0	-1	248	1,305	1,703	1,0	0,005
L ^{„N“}	1	-1	108	1,000	1,305	0,7	0,007
L ^{„W“}	1	1	814	1,000	1,305	5,4	0,007
L _{2;1}	2	1	154	0,432	0,563	1,7	0,011
L _{3;2}	3	2	130	0,204	0,266	2,3	0,018
L _{4;3}	4	3	112	0,038	0,050	2,7	0,024
L _{9;7}	9	7	52	0,029	0,037	2,9	0,055
L _{13;10}	13	10	36	0,007	0,010	2,8	0,079
L _{17;13}	17	13	27	0,004	0,005	2,8	0,104
L _{77;59}	77	59	6	0,000	0,000	2,8	0,469
L _{59;77}	59	77	∞	∞	∞		
L _{13;17}	13	17	7326	271,0	353,7	709	0,097
L _{10;13}	10	13	4884	137,0	178,8	362	0,074
L _{7;9}	7	9	1832	35,00	45,68	94,6	0,052
L _{3;4}	3	4	2931	26,20	34,19	66,0	0,023
L _{2;3}	2	3	637	4,913	6,412	10,2	0,016
L _{1;2}	1	2	357	2,317	3,024	3,4	0,010
L₁	1	0	190	0,747	1,000	1,0	0,005
E_{5a}	0	-1	255	1,339	1,793	1,0	0,004

L ^{„N“}	1	-1	109	1,000	1,339	0,7	0,007
L ^{„W“}	1	1	751	1,000	1,339	4,9	0,007
L _{2;1}	2	1	152	0,394	0,527	1,7	0,011
L _{3;2}	3	2	126	0,159	0,214	2,2	0,018
L _{4;3}	4	3	108	0,007	0,010	2,6	0,024
L _{7;5}	7	5	58	0,070	0,093	2,4	0,042
L _{11;8}	11	8	38	0,043	0,057	2,5	0,066
L _{13;10}	13	10	34	0,053	0,071	2,7	0,079
L _{15;11}	15	11	28	0,030	0,040	2,5	0,090
L _{31;23}	31	23	14	0,011	0,014	2,6	0,186
L _{154;115}	154	115	3	0,000	0,000	2,6	0,927
L _{115;154}	115	145	∞	∞	∞		
L _{23;31}	23	31	1274	92,57	124,0	219	0,172
L _{11;15}	11	15	945	33,71	45,14	78,0	0,083
L _{10;13}	10	13	651	18,93	25,35	47,7	0,073
L _{8;11}	8	11	888	23,46	31,41	53,5	0,060
L _{5;7}	5	7	837	14,37	19,25	31,8	0,038
L _{3;4}	3	4	14652	135,5	181,5	326	0,022
L _{2;3}	2	3	792	6,270	8,397	12,5	0,016
L _{1;2}	1	2	386	2,539	3,401	3,6	0,009
L₁	1	0	190	0,756	1,000	1,0	0,005
E_{5ab}	0	-1	252	1,322	1,747	1,0	0,004
L ^{„N“}	1	-1	108	1,000	1,322	0,7	0,007
L ^{„W“}	1	1	781	1,000	1,322	5,1	0,007
L _{2;1}	2	1	153	0,413	0,545	1,7	0,011
L _{3;2}	3	2	128	0,181	0,240	2,3	0,018
L _{4;3}	4	3	110	0,015	0,020	2,7	0,024
L _{9;7}	9	7	51	0,052	0,068	2,8	0,055
L _{17;13}	17	13	27	0,019	0,026	2,7	0,103
L _{25;19}	25	19	18	0,008	0,011	2,7	0,152
L _{308;233}	308	233	1	0,000	0,000	2,7	1,865
L _{233;308}	233	308	∞	∞	∞		
L _{19;25}	19	25	2171	121,2	160,2	306	0,141
L _{10;13}	10	13	1149	32,82	43,39	84,7	0,074
L _{7;9}	7	9	993	19,34	25,56	51,0	0,051
L _{5;7}	5	7	644	10,89	14,40	24,7	0,038
L _{3;4}	3	4	7326	66,63	88,07	164	0,022
L _{2;3}	2	3	706	5,518	7,294	11,2	0,016
L _{1;2}	1	2	371	2,424	3,204	3,5	0,010
E₆	1	0	234	0,944	1,000	1,0	0,004
E_{5b}	0	-1	248	1,059	1,122	1,0	0,004
L _N	1	-1	121	1,000	1,059	0,7	0,006
L _W	1	1	4186	1,000	1,059	24,6	0,006
L _{2;1}	2	1	222	0,841	0,891	2,1	0,009
L _{15;14}	15	14	131	0,090	0,095	11,2	0,085
L _{18;17}	18	17	120	0,004	0,004	12,4	0,103
L _{125;118}	125	118	17	0,000	0,000	12,3	0,714

L _{118;125}	118	125	∞	∞	∞		
L _{17;18}	17	18	29306	244,0	258,5	3005	0,103
L _{14;15}	14	15	1465	11,15	11,81	125	0,085
L _{1;2}	1	2	264	1,189	1,260	2,4	0,009
E₆	1	0	234	0,920	1,000	1,0	0,004
E_{5a}	0	-1	255	1,087	1,181	1,0	0,004
L _N	1	-1	122	1,000	1,087	0,7	0,006
L _W	1	1	2931	1,000	1,087	17,0	0,006
L _{2;1}	2	1	217	0,778	0,845	2,0	0,009
L _{13;12}	13	12	120	0,020	0,022	8,7	0,073
L _{25;23}	25	23	61	0,000	0,000	8,5	0,140
L _{23;25}	23	25	∞	∞	∞		
L _{12;13}	12	13	5861	49,00	53,26	424	0,072
L _{1;2}	1	2	279	1,286	1,398	2,5	0,009
E_{5b}	1	0	248	0,975	1,000	1,0	0,004
E_{5a}	0	-1	255	1,026	1,053	1,0	0,004
L _N	1	-1	126	1,000	1,026	0,7	0,006
L _W	1	1	9768	1,000	1,026	54,9	0,006
L _{2;1}	2	1	242	0,926	0,950	2,2	0,009
L _{39;38}	39	38	126	0,004	0,004	27,4	0,217
L _{118;115}	118	115	42	0,000	0,000	27,5	0,655
L _{115;118}	115	118	∞	∞	∞		
L _{38;39}	38	39	29311	232,0	238,1	6343	0,216
L _{1;2}	1	2	262	1,080	1,109	2,3	0,009

Tabelle A-2: Linearkombinationen aus zwei Signalen für GALILEO

Signal	a ₁	a ₂	a ₃	λ _{LK} [mm]	$\frac{ION_{LK}[m]}{ION_{L_i}[m]}$	σ _{φ,LK} [mm]	σ _{φ,LK} [cyc]
L ₁	1	0	0	190	1,000	1,0	0,005
L ₂	0	-1	0	244	1,647	1,0	0,004
L ₅	0	0	-1	235	1,793	1,0	0,004
L _{“N1”}	1	-1	-1	75	1,434	0,6	0,008
L _{“N2”}	1	-1	1	184	0,915	1,4	0,008
L _{“N3”}	1	1	-1	197	1,091	1,5	0,008
L _{“W”}	1	1	1	362	3,085	2,8	0,008
L _{1;4;-3}	1	4	-3	1542	0,940	32,2	0,021
L _{1;5;-4}	1	5	-4	2093	0,662	55,1	0,026
L _{2;-1;2}	2	-1	2	148	0,471	2,0	0,014
L _{3;1;1}	3	1	1	129	0,256	2,2	0,017
L _{3;-2;4}	3	-2	4	121	0,134	2,9	0,024
L _{1;6;-5}	1	6	-5	3256	0,074	103,8	0,032
L _{4;1;2}	4	1	2	110	0,022	2,5	0,023
L _{3;-6;8}	3	-6	8	112	0,008	4,8	0,043
L _{77;84;-23}	77	84	-23	7	0,000	3,6	0,539
L _{10;9;4}	10	9	4	∞	∞		
L _{6;1;7}	6	1	7	29307	717,27	1231	0,042

L _{3;1;3}	3	1	3	9769	118,11	196	0,020
L _{3;2;2}	3	2	2	3663	43,215	71,1	0,019
L _{4;4;1}	4	4	1	1395	18,131	37,6	0,027
L _{2;-1;4}	2	-1	4	916	9,977	17,7	0,019
L _{2;2;1}	2	2	1	624	6,245	8,7	0,014

Tabelle A-3: Linearkombinationen aus drei Signalen für GPS

Signal	a ₁	a ₂	a ₃	λ_{LK} [mm]	$\frac{ION_{LK}[m]}{ION_{L_1}[m]}$	$\sigma_{\phi,LK}$ [mm]	$\sigma_{\phi,LK}$ [cyc]
L ₁	1	0	0	190	1,000	1,0	0,005
E _{5a}	0	-1	0	255	1,793	1,0	0,004
E ₆	0	0	-1	234	1,518	1,0	0,004
L ^{“N1“}	1	-1	-1	74	1,396	0,6	0,008
L ^{“N2“}	1	1	-1	179	0,838	1,4	0,008
L ^{“N3“}	1	-1	1	204	1,184	1,6	0,008
L ^{“W“}	1	1	1	341	2,813	2,7	0,008
L _{1;2;-2}	1	2	-2	168	0,695	2,1	0,013
L _{2;2;-1}	2	2	-1	144	0,420	2,0	0,014
L _{1;-2;3}	1	-2	3	3256	0,304	51,8	0,016
L _{3;1;1}	3	1	1	132	0,298	2,2	0,017
L _{3;3;-1}	3	3	-1	121	0,137	2,4	0,020
L _{3;4;-2}	3	4	-2	116	0,066	2,8	0,024
L _{3;5;-3}	3	5	-3	112	0,0002	3,2	0,028
L _{154;138;-25}	154	138	-25	3	0,000	2,6	0,980
L _{5;-2;8}	5	-2	8	∞	∞	∞	
L _{4;1;4}	4	1	4	29304	349,12	802	0,027
L _{2;7;-4}	2	7	-4	9768	125,55	332	0,034
L _{3;3;1}	3	3	1	3663	43,301	73,7	0,020
L _{3;2;2}	3	2	2	1628	18,328	31,9	0,020
L _{2;2;1}	2	2	1	624	6,259	8,6	0,014
L _{1;3;-1}	1	3	-1	444	4,166	6,0	0,014
L ₁	1	0	0	190	1,000	1,0	0,005
E _{5a}	0	-1	0	255	1,793	1,0	0,004
E _{5b}	0	0	-1	248	1,703	1,0	0,004
L ^{“N1“}	1	-1	-1	76	1,450	0,6	0,008
L ^{“N2“}	1	1	-1	187	0,947	1,4	0,008
L ^{“N3“}	1	-1	1	194	1,055	1,5	0,008
L ^{“W“}	1	1	1	371	3,205	2,9	0,008
L _{2;-1;2}	2	-1	2	157	0,600	2,2	0,014
L _{2;2;-1}	2	2	-1	150	0,493	2,1	0,014
L _{1;-8;9}	1	-8	9	2442	0,420	118	0,048
L _{3;-1;3}	3	-1	3	131	0,293	2,7	0,020
L _{3;3;-1}	3	3	-1	125	0,189	2,5	0,020
L _{4;1;2}	4	1	2	111	0,029	2,5	0,023
L _{8;5;1}	8	5	1	109	0,0002	2,5	0,047
L _{77;115;-59}	77	115	-59	5	0,000	3,4	0,651
L _{9;10;2}	9	10	2	∞	∞	∞	

L _{3;3;1}	3	3	1	29306	357,67	589	0,020
L _{3;2;2}	3	2	2	7326	88,105	142	0,019
L _{3;1;3}	3	1	3	4186	49,597	84,8	0,020
L _{4;1;4}	4	1	4	1011	13,592	27,1	0,027
L _{2;2;1}	2	2	1	733	7,636	10,1	0,014
L _{2;1;2}	2	1	2	682	6,981	9,4	0,014
L _{1;3;-1}	1	3	-1	401	3,612	5,4	0,014
L₁	1	0	0	190	1,000	1,0	0,005
E_{5a}	0	-1	0	255	1,793	1,0	0,004
E_{5ab}	0	0	-1	252	1,747	1,0	0,004
L _{“N1“}	1	-1	-1	76	1,463	0,6	0,008
L _{“N2“}	1	1	-1	188	0,973	1,4	0,008
L _{“N3“}	1	-1	1	192	1,027	1,5	0,008
L _{“W“}	1	1	1	378	3,301	2,9	0,008
L _{2;-1;2}	2	-1	2	154	0,564	2,1	0,014
L _{2;3;2}	2	3	-2	150	0,492	2,6	0,018
L _{1;-17;18}	1	-17	18	2442	0,369	239	0,098
L _{3;1;1}	3	1	1	127	0,226	2,1	0,017
L _{1;-19;20}	1	-19	20	3256	0,098	355	0,109
L _{4;2;1}	4	2	1	109	0,00009	2,5	0,023
L _{77;115;-59}	154	-115	233	3	0,000	3,9	1,310
L _{9;8;4}	9	8	4	∞	∞	∞	
L _{3;3;1}	3	3	1	58607	720,46	1176	0,020
L _{3;1;3}	3	1	3	11722	141,98	236	0,020
L _{3;-1;5}	3	-1	5	5328	63,568	137	0,026
L _{4;2;3}	4	2	3	803	11,155	20,4	0,025
L _{2;2;1}	2	2	1	761	8,001	10,4	0,014
L _{2;1;2}	2	1	2	733	7,634	10,1	0,014
L _{1;-1;3}	1	-1	3	364	3,112	5,0	0,014

Tabelle A-4: Linearkombinationen aus drei Signalen für GALILEO

B Anhang zu Kp-Werten

Im Folgenden sind die K_p -Werte für die Jahre 2003 und 2006 dargestellt (Quelle: <ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/>). Links unten ist jeweils eine Legende angegeben, + und – bedeutet jeweils eine $1/3$ Unterteilung der K_p -Werte. Gut zu erkennen ist der ionosphärische Sturm Ende Oktober 2003.

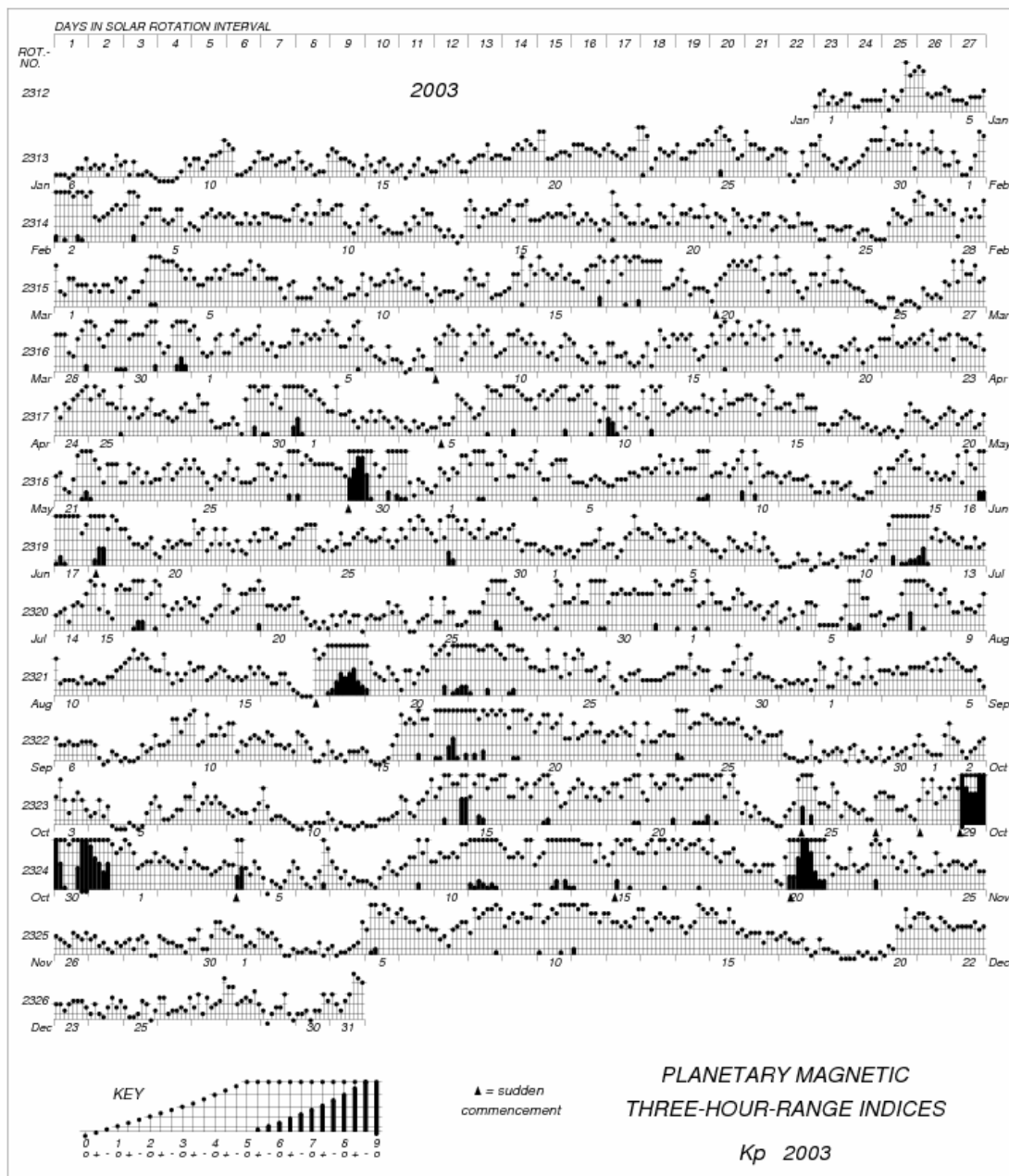


Abbildung B-1: K_p -Werte für das Jahr 2003 in Form eines „Musikdiagramms“

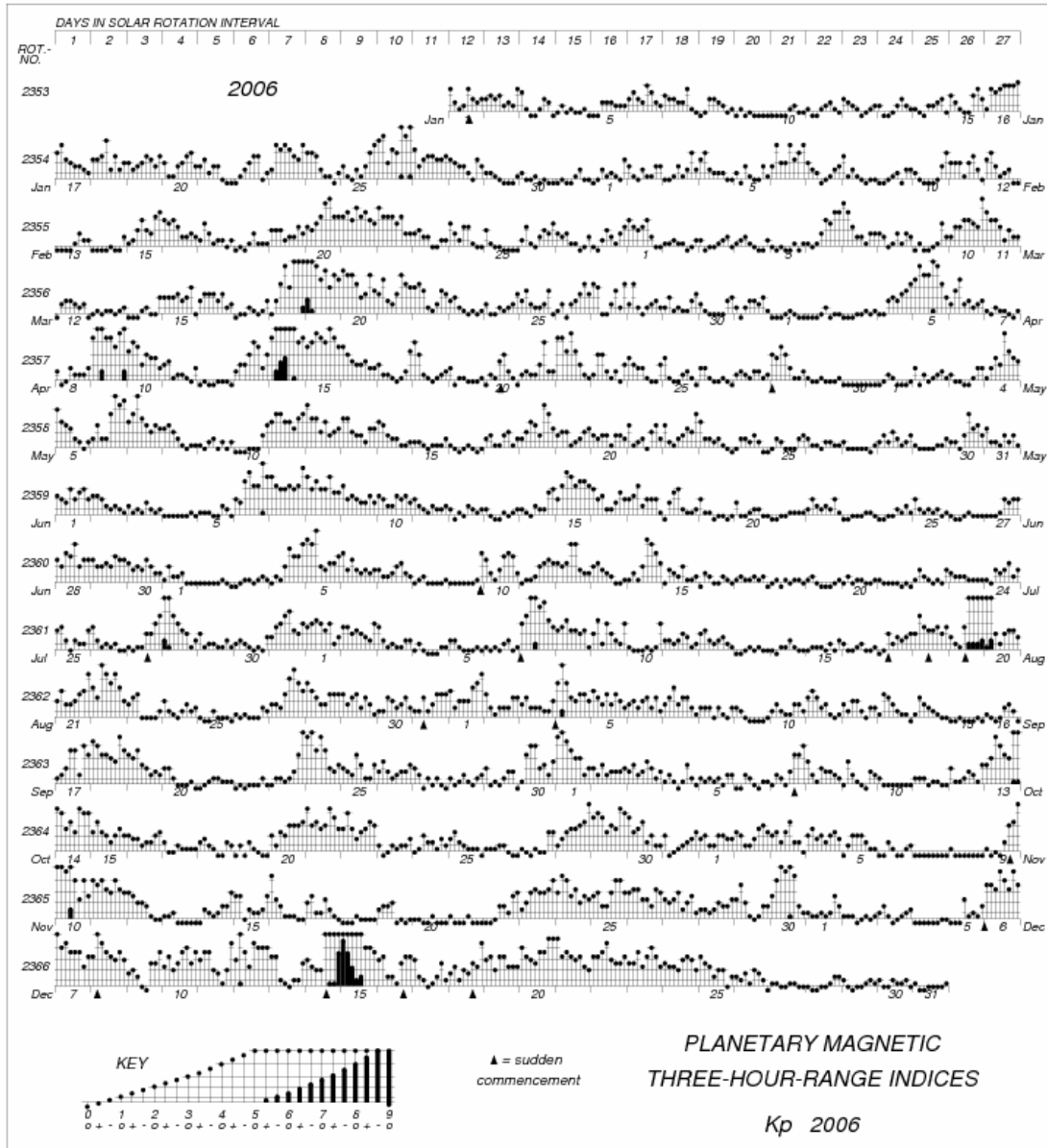


Abbildung B-2: K_p -Werte für das Jahr 2006 in Form eines „Musikdiagramms“

C Anhang zu den Ergebnissen der Flächenkorrekturparameteranalyse

Netz Bayern

In den folgenden Tabellen werden die Mittelwerte der Standardabweichungen der Differenzen aller doppelten Differenzen über 2h aufgeführt. Dabei wird unterschieden zwischen ungeglätteten Werten und über 60 bzw. 120 sec geglättete Werte für die Ionosphäre und über 120 bzw. 300 sec geglättete Werte für die Troposphäre.

Für alle Ergebnisse gilt, dass eine Elevationsmaske von 10° verwendet wurde und als à priori Ionosphärenmodell das Klobuchar-Modell und als à priori Troposphärenmodell numerische Wettermodelle (NWM) verwendet wurde.

In Tabelle C-1 bis Tabelle C-4 stehen die Abkürzungen „Sat“ für den satelliten-spezifischen Korrekturansatz und „Stat“ für den stations-spezifischen Korrekturansatz. Der Wert „2“ steht für die klassischen Flächenkorrekturparameter in Abhängigkeit der Breite und Länge, „3“ heißt zusätzlich ein bilinearer Koeffizient und „2V“ zusätzlich ein Höhengradient.

	12-14 h	14-16 h	16-18 h
Ionosphäre 0 s / 60 s / 120 s	19,8 / 19,4 / 18,8	18,8 / 18,0 / 17,5	13,5 / 12,9 / 12,7
Troposphäre (Sat) 0 s / 120 s / 300 s	16,3 / 15,2 / 13,2	20,5 / 18,6 / 16,3	13,6 / 12,2 / 11,1
Troposphäre (Stat) 0 s / 120 s / 300 s	18,9 / 17,3 / 15,3	26,6 / 24,0 / 21,4	19,2 / 17,3 / 15,9

Tabelle C-1: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für nördliches Teilnetz; Tag 138 des Jahres 2006; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 10° cut-off

	12-14 h	14-16 h	16-18 h
Ionosphäre 0 s / 60 s / 120 s	13,4 / 12,2 / 12,0	11,9 / 10,1 / 9,7	14,6 / 13,2 / 12,8
Troposphäre (Sat) 0 s / 120 s / 300 s	13,9 / 12,3 / 11,8	27,1 / 25,1 / 23,5	17,1 / 15,5 / 14,6
Troposphäre (Stat) 0 s / 120 s / 300 s	14,4 / 12,0 / 11,2	17,7 / 14,5 / 13,1	16,4 / 13,9 / 12,8

Tabelle C-2: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für südliches Teilnetz; Tag 138 des Jahres 2006; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 10° cut-off

	12-14 h	14-16 h	16-18 h
Ionosphäre (2) 0 s / 60 s / 120 s	18,6 / 17,9 / 17,4	19,5 / 18,4 / 17,8	14,9 / 14,1 / 13,7
Ionosphäre (3) 0 s / 60 s / 120 s	20,6 / 19,4 / 18,6	19,0 / 17,6 / 16,9	15,2 / 14,4 / 14,0
Troposphäre (Sat) (2) 0 s / 120 s / 300 s	16,8 / 14,9 / 13,2	18,1 / 15,8 / 13,4	13,9 / 12,2 / 10,9
Troposphäre (Sat) (2V) 0 s / 120 s / 300 s	21,9 / 19,3 / 17,5	22,6 / 19,9 / 17,3	16,8 / 14,6 / 12,8
Troposphäre (Sat) (3) 0 s / 120 s / 300 s	17,7 / 15,4 / 13,6	20,6 / 18,2 / 15,7	12,8 / 11,0 / 9,9
Troposphäre (Stat) (2) 0 s / 120 s / 300 s	17,6 / 15,5 / 13,9	20,5 / 17,8 / 15,3	13,4 / 11,6 / 10,2

Tabelle C-3: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für nördliches Teilnetz plus Station AUER; Tag 138 des Jahres 2006; 2, 2+V, 3 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 10° cut-off

	12-14 h	14-16 h	16-18 h
Ionosphäre (2) 0 s / 60 s / 120 s	14,0 / 12,3 / 11,9	13,2 / 11,1 / 10,6	13,4 / 11,5 / 11,0
Ionosphäre (3) 0 s / 60 s / 120 s	15,3 / 13,4 / 13,0	14,7 / 12,2 / 11,6	15,0 / 12,7 / 12,2
Troposphäre (Sat) (2) 0 s / 120 s / 300 s	14,8 / 12,6 / 11,9	27,4 / 25,1 / 23,6	27,2 / 25,0 / 23,2
Troposphäre (Sat) (2V) 0 s / 120 s / 300 s	19,8 / 17,1 / 16,0	34,9 / 31,6 / 29,6	37,3 / 34,4 / 31,8
Troposphäre (Sat) (3) 0 s / 120 s / 300 s	16,1 / 13,5 / 12,6	28,7 / 25,9 / 24,3	28,7 / 26,0 / 24,1
Troposphäre (Stat) (2) 0 s / 120 s / 300 s	13,7 / 10,4 / 9,3	20,8 / 18,0 / 16,5	17,9 / 15,2 / 13,9

Tabelle C-4: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für südliches Teilnetz plus Station MIND; Tag 138 des Jahres 2006; 2, 2+V, 3 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 10° cut-off

Netz Thüringen

In Abbildung C-1 bis Abbildung C-3 ist für die Teilnetze 1, 2 und 3 das doppelt differenzierte ionosphärische Residuum für fünf ausgewählte Zeiträume dargestellt. In jeweils allen fünf Grafiken für ein Netz hat die y-Achse denselben Wertebereich, um die unterschiedliche Ionosphärenaktivität besser darstellen zu können.

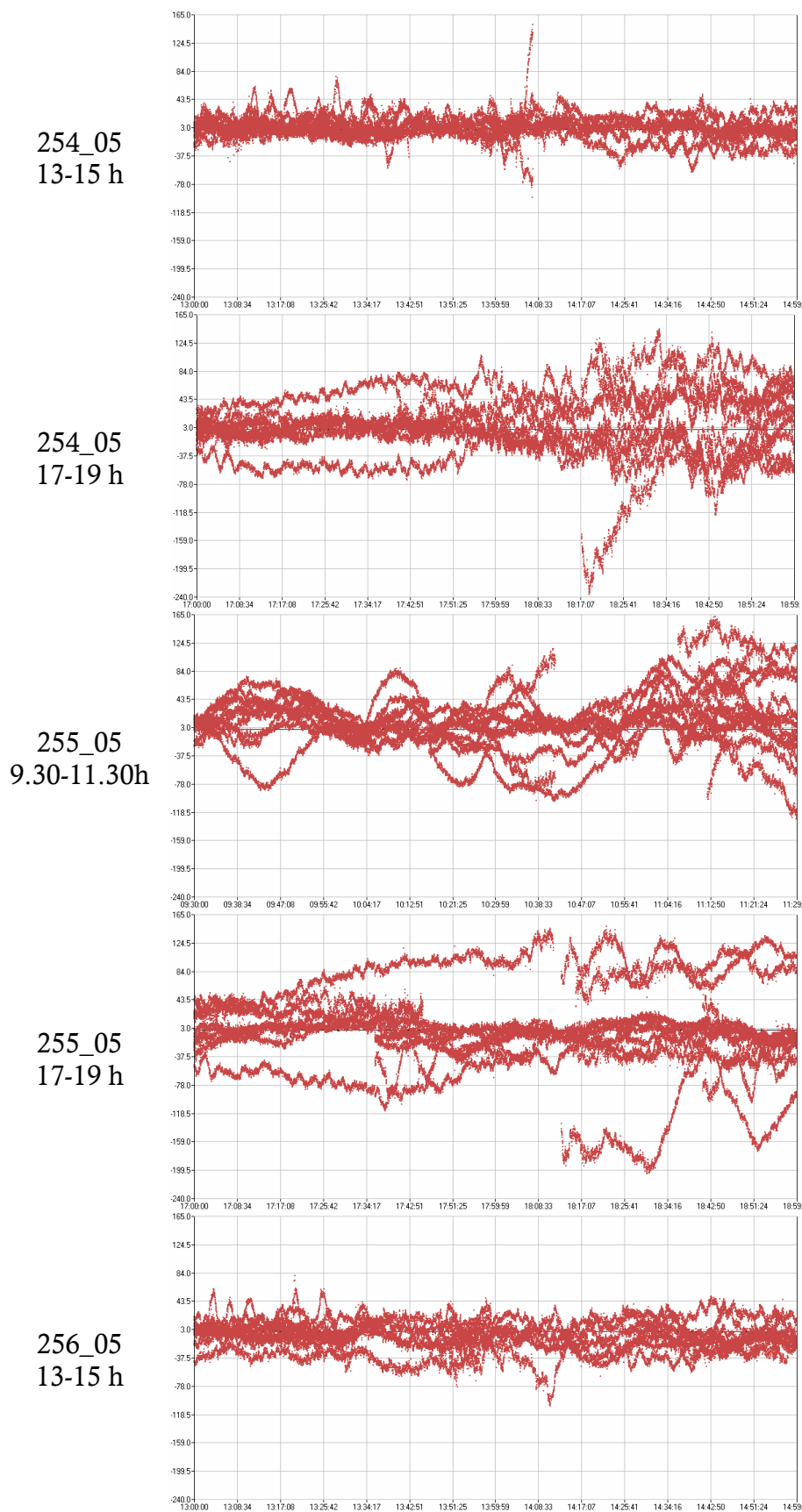


Abbildung C-1: Doppelt differenziertes ionosphärisches Residuum im Teilnetz 1 mit einer durchschnittlichen Basislinienlänge von 27 km; jeweils im Bereich -240 – 165 mm

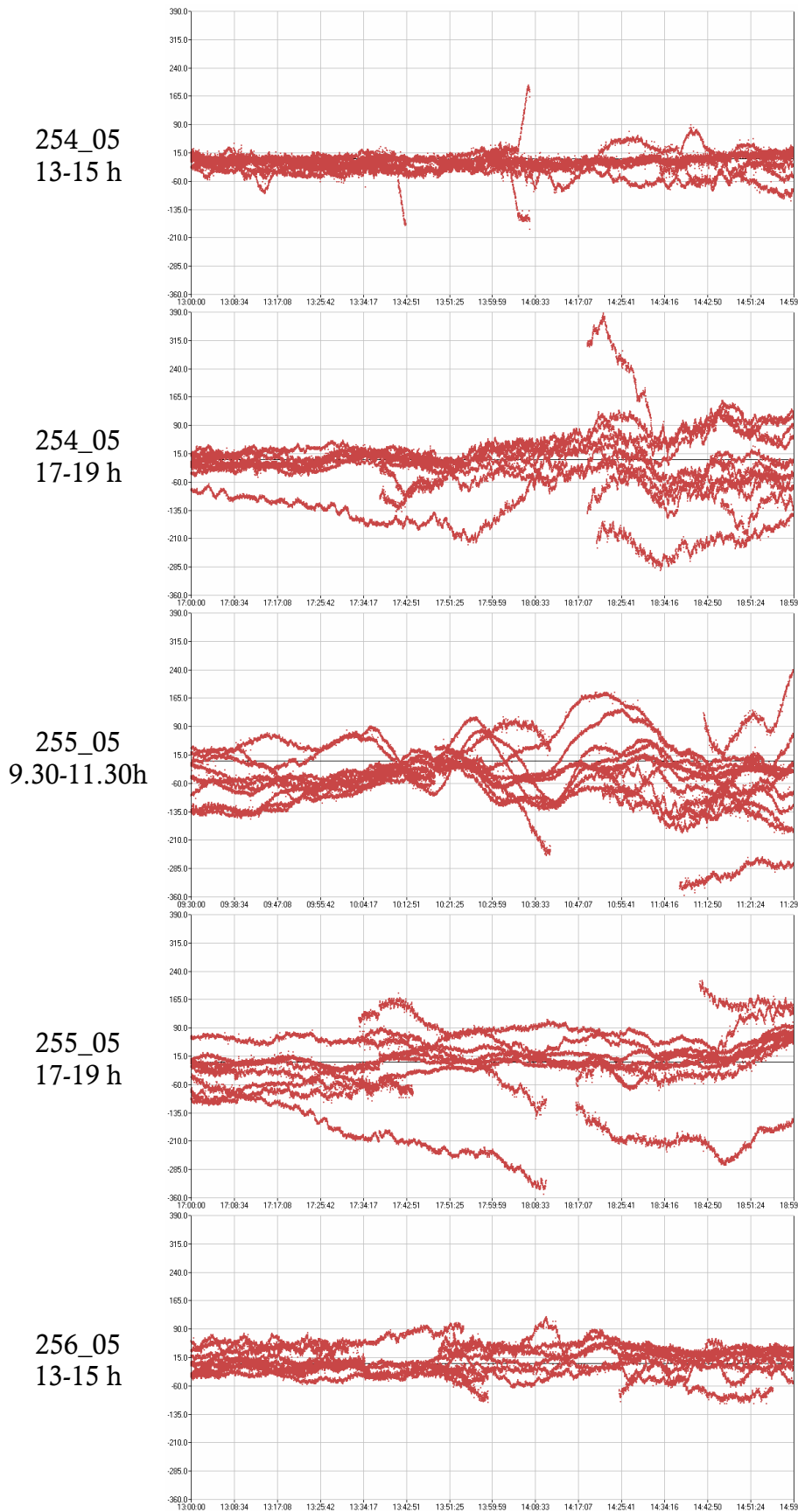


Abbildung C-2: Doppelt differenziertes ionosphärisches Residuum im Teilnetz 2 mit einer durchschnittlichen Basislinienlänge von 50 km; jeweils im Bereich -360 – 390 mm

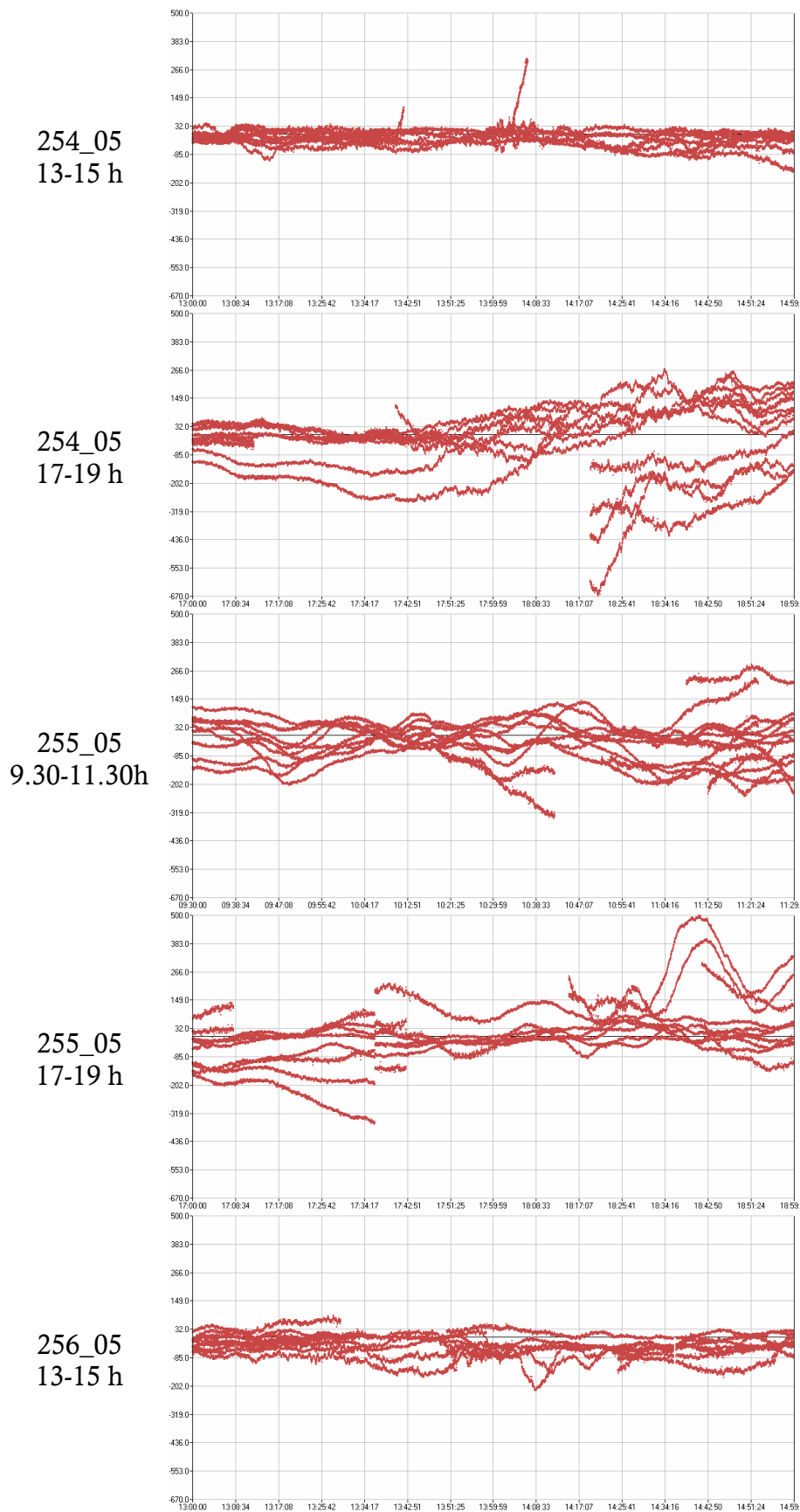


Abbildung C-3: Doppelt differenziertes ionosphärisches Residuum im Teilnetz 3 mit einer durchschnittlichen Basislinienlänge von 67 km; jeweils im Bereich -670 – 500 mm

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse für Teilnetz 1 (Tabelle C-5 und Tabelle C-6), Teilnetz 2 (Tabelle C-7 und Tabelle C-8) sowie Teilnetz 3 (Tabelle C-9 und Tabelle C-10) dargestellt. Die Tabellen unterscheiden sich jeweils durch das gewählte à priori Modell – für die Ionosphäre das Klobuchar-Modell bzw. IONEX-Karten und für die Troposphäre numerische Wettermodelle (NWM) bzw. TropGrid.

Zeitraum	Ionosphäre 0 s / 60 s / 120 s	Troposphäre (Sat) 0 s / 120 s / 300 s	Troposphäre (Stat) 0 s / 120 s / 300 s
254_05 13-15 h	12,7 / 11,8 / 11,1	14,5 / 12,1 / 9,5	17,1 / 14,4 / 11,8
254_05 17-19 h	13,6 / 12,3 / 11,2	14,7 / 12,0 / 8,4	16,7 / 14,0 / 10,6
255_05 9.30-11.30h	11,2 / 10,5 / 10,1	11,2 / 9,2 / 7,2	12,8 / 10,7 / 8,9
255_05 17-19 h	12,1 / 11,1 / 10,3	15,4 / 12,8 / 9,2	18,0 / 15,3 / 11,9
256_05 13-15 h	13,6 / 12,6 / 11,8	19,5 / 17,0 / 13,7	20,8 / 17,9 / 14,4

Tabelle C-5: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für Teilnetz 1; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

Zeitraum	Ionosphäre 0 s / 60 s / 120 s	Troposphäre (Sat) 0 s / 120 s / 300 s	Troposphäre (Stat) 0 s / 120 s / 300 s
254_05 13-15 h	15,8 / 15,0 / 14,4	17,5 / 15,4 / 13,8	19,5 / 17,1 / 15,5
254_05 17-19 h	13,6 / 12,5 / 11,9	14,5 / 12,3 / 10,0	16,8 / 14,6 / 12,4
255_05 9.30-11.30h	11,4 / 10,8 / 10,5	11,2 / 9,6 / 8,1	13,0 / 11,1 / 9,8
255_05 17-19 h	12,2 / 11,4 / 10,8	16,1 / 14,3 / 12,2	18,1 / 16,1 / 14,1
256_05 13-15 h	13,5 / 12,7 / 12,1	20,9 / 19,1 / 17,5	20,6 / 18,4 / 16,6

Tabelle C-6: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für Teilnetz 1; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = IONEX, Troposphärenmodell = TropGrid; 15° cut-off

Zeitraum	Ionosphäre 0 s / 60 s / 120 s	Troposphäre (Sat) 0 s / 120 s / 300 s	Troposphäre (Stat) 0 s / 120 s / 300 s
254_05 13-15 h	12,7 / 11,4 / 10,2	15,8 / 12,5 / 10,5	19,0 / 15,7 / 13,9
254_05 17-19 h	12,3 / 11,1 / 10,3	14,9 / 12,5 / 11,6	17,9 / 15,4 / 14,4
255_05 9.30-11.30h	14,2 / 13,5 / 13,1	10,9 / 8,8 / 7,9	14,1 / 12,0 / 11,0
255_05 17-19 h	10,3 / 9,2 / 8,3	19,3 / 17,2 / 15,9	19,7 / 17,3 / 16,1
256_05 13-15 h	11,5 / 10,3 / 9,2	16,2 / 13,4 / 11,6	21,7 / 18,9 / 17,1

Tabelle C-7: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für Teilnetz 2; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

Zeitraum	Ionosphäre 0 s / 60 s / 120 s	Troposphäre (Sat) 0 s / 120 s / 300 s	Troposphäre (Stat) 0 s / 120 s / 300 s
254_05 13-15 h	11,9 / 10,6 / 9,3	16,0 / 12,6 / 10,5	18,3 / 15,0 / 13,1
254_05 17-19 h	12,6 / 11,5 / 10,7	14,6 / 12,2 / 11,2	16,9 / 14,3 / 13,6
255_05 9.30-11.30h	14,0 / 13,3 / 12,9	10,4 / 8,2 / 7,3	13,1 / 11,1 / 10,2
255_05 17-19 h	11,7 / 10,7 / 9,8	16,2 / 13,8 / 12,4	19,7 / 17,1 / 15,9
256_05 13-15 h	11,7 / 10,6 / 9,4	16,7 / 14,0 / 12,2	19,7 / 17,0 / 15,4

Tabelle C-8: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für Teilnetz 2; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = IONEX, Troposphärenmodell = TropGrid; 15° cut-off

Zeitraum	Ionosphäre 0 s / 60 s / 120 s	Troposphäre (Sat) 0 s / 120 s / 300 s	Troposphäre (Stat) 0 s / 120 s / 300 s
254_05 13-15 h	9,0 / 8,1 / 7,8	11,9 / 10,4 / 10,1	13,6 / 11,6 / 11,2
254_05 17-19 h	14,8 / 14,0 / 13,5	9,7 / 7,9 / 7,7	14,7 / 13,0 / 12,8
255_05 9.30-11.30h	---	---	---
255_05 17-19 h	---	---	---
256_05 13-15 h	10,3 / 9,6 / 9,2	11,5 / 10,0 / 9,7	18,2 / 16,5 / 16,0

Tabelle C-9: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für Teilnetz 3; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

Zeitraum	Ionosphäre 0 s / 60 s / 120 s	Troposphäre (Sat) 0 s / 120 s / 300 s	Troposphäre (Stat) 0 s / 120 s / 300 s
254_05 13-15 h	8,6 / 7,7 / 7,4	11,6 / 10,2 / 9,9	13,1 / 11,1 / 10,7
254_05 17-19 h	15,0 / 14,2 / 13,8	9,0 / 7,1 / 6,9	10,9 / 8,8 / 8,6
255_05 9.30-11.30h	---	---	---
255_05 17-19 h	---	---	---
256_05 13-15 h	9,5 / 8,7 / 8,4	11,3 / 9,8 / 9,6	12,5 / 10,4 / 10,1

Tabelle C-10: Mittlere Standardabweichung der Differenzen [mm] für Teilnetz 3; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = IONEX, Troposphärenmodell = TropGrid; 15° cut-off

D Anhang zur Korrelationsanalyse der DGPS-Position

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Korrelationsanalyse der DGPS-Position für 10 s, 20 s und 40 s Intervalle über insgesamt zwei Stunden dargestellt.

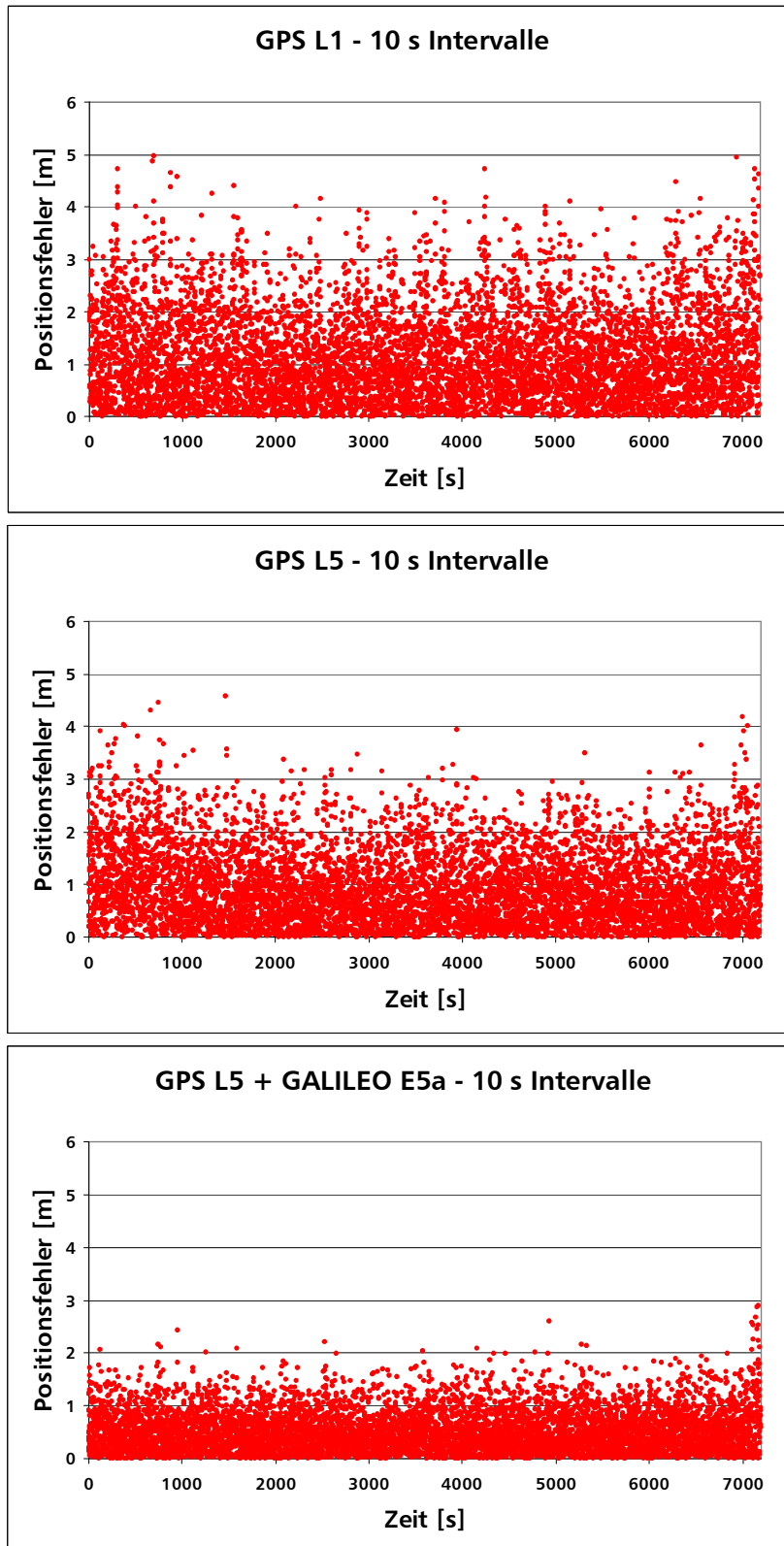


Abbildung D-1: Korrelationsanalyse für ein Zeitintervall von 10 s

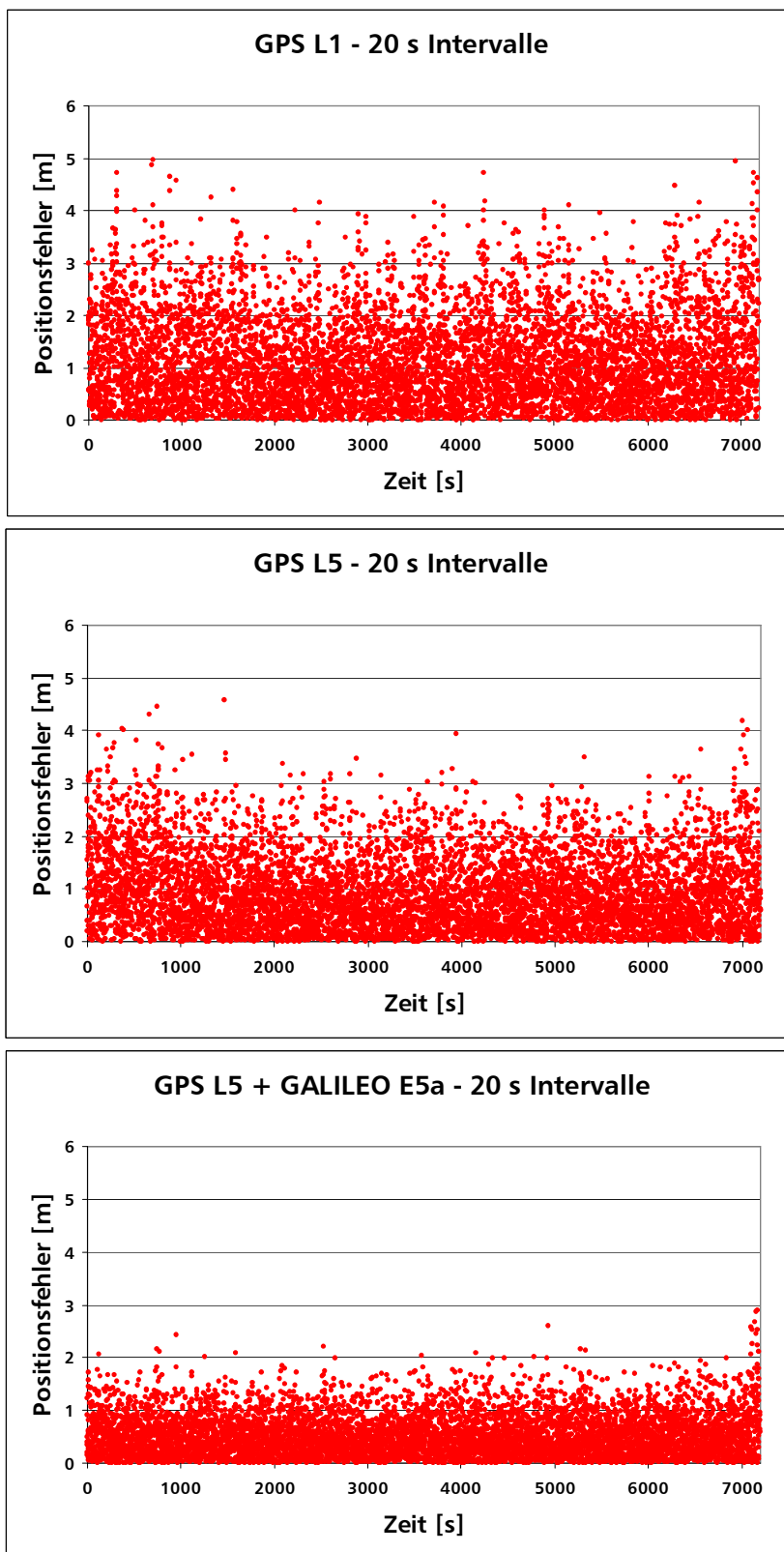


Abbildung D-2: Korrelationsanalyse für ein Zeitintervall von 20 s

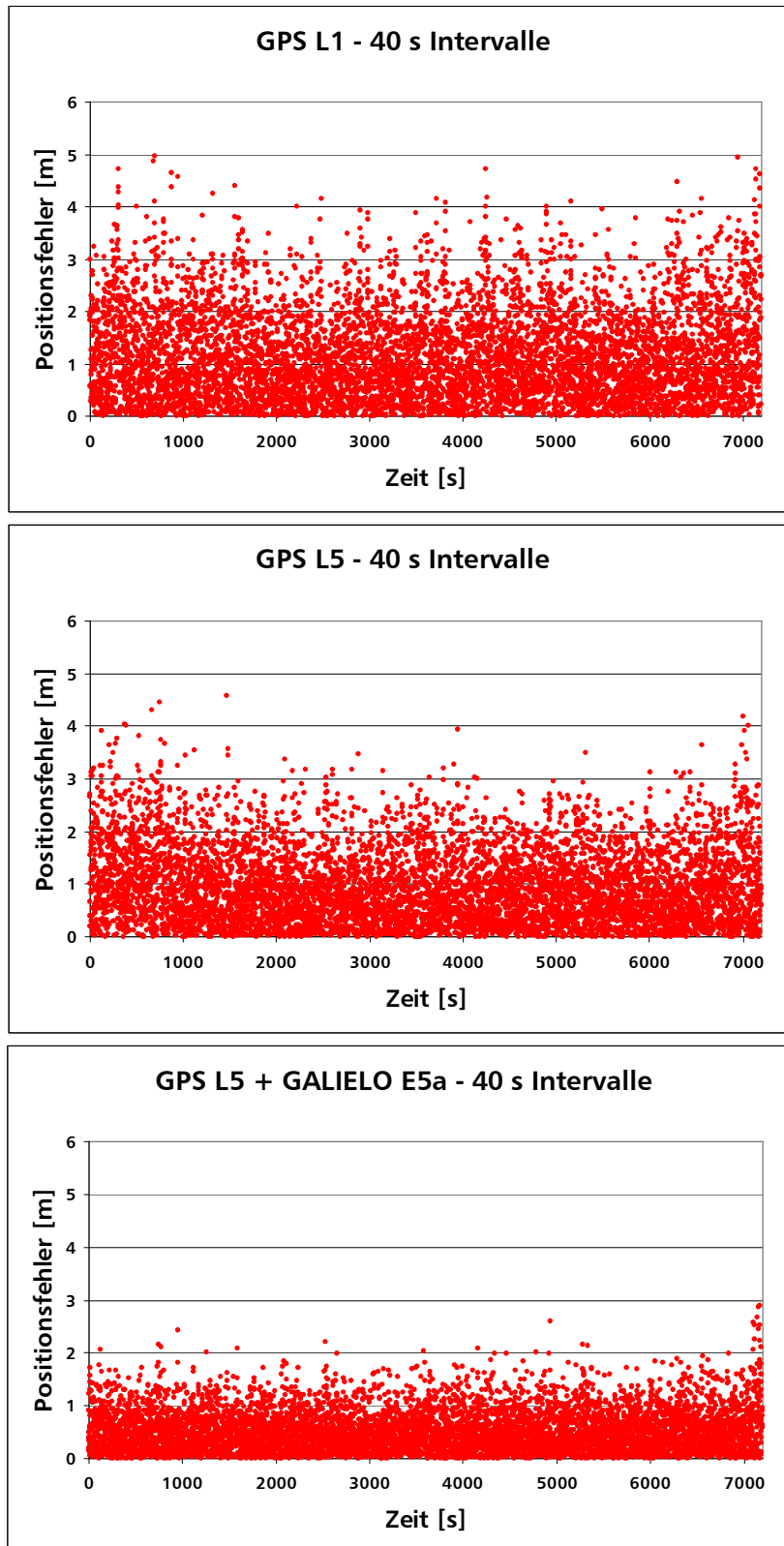


Abbildung D-3: Korrelationsanalyse für ein Zeitintervall von 40 s

E Anhang zu den Ergebnissen der Untersuchungen der schnellen präzisen Positionierung mit SEMIKA

Netz Thüringen

In Tabelle E-1 (Positionsfehler) und Tabelle E-2 (Mehrdeutigkeitsfixierung) sind die Ergebnisse aus der Positionierung ohne Verwendung von Flächenkorrekturparametern für drei ausgewählte Zeiträume zusammengefasst, d.h. es wurden nur à priori Modelle zur Korrektur der ionosphärischen und troposphärischen Laufzeitverzögerung verwendet.

Zeitraum	60 s - klein	60 s - mittel	60 s - groß
254_05 17-19 h	116 / 119 / 174	150 / 233 / 296	76 / 78 / 114
255_05 9.30-11.30h	28 / 40 / 51	50 / 50 / 75	265 / 285 / 410
255_05 17-19 h	83 / 105 / 142	78 / 125 / 152	110 / 111 / 167

Tabelle E-1: Mittlerer Positionsfehler (horizontal / vertikal / gesamt) [mm] für kleines, mittleres und großes Teilnetz; keine Flächenkorrekturparameter verwendet; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = TropGrid; 15° cut-off

Zeitraum	60 s - klein	60 s - mittel	60 s - groß
254_05 17-19 h	69,7/3,1/6,4/20,8	70,6/8,2/3,0/18,2	80,3/5,1/1,4/13,2
255_05 9.30-11.30h	94,1/1,1/0/4,8	87,8/2,5/0/9,7	61,9/9,0/0/29,1
255_05 17-19 h	84,9/0,7/4,1/10,3	86,7/2,1/3,0/8,2	67,3/4,9/1,6/26,2

Tabelle E-2: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linearkombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar) für kleines, mittleres und großes Teilnetz; keine Flächenkorrekturparameter verwendet; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = TropGrid; 15° cut-off

In den folgenden Tabellen und Abbildungen werden nun die Ergebnisse unter Verwendung von Flächenkorrekturparametern präsentiert.

Als à priori Korrekturmodell wurde für die Ionosphäre immer das Klobuchar-Modell und für die Troposphäre numerische Wettermodelle verwendet. Die verbleibenden Restfehler wurden immer mit Hilfe von zwei Flächenkorrekturparametern (Breite und Länge) modelliert. Die Elevationsmaske wurde bei 15° gewählt.

Die Ergebnisse für das kleine thüringische Teilnetz mit einer Basislinienlänge Rover – nächstgelegene Referenzstation von 19 km sind bzgl. der mittleren Positionsfehler in Tabelle E-3 und Abbildung E-1 sowie bzgl. der Mehrdeutigkeitslösung in Tabelle E-4 und Abbildung E-2 dargestellt. Um einen besseren Vergleich – Positionierung mit Hilfe von Flächenkorrekturparametern sowie ohne – sind in Abbildung E-1 und Abbildung E-2 ebenfalls die Ergebnisse ohne Flächenkorrekturparameter (in blau) aufgeführt (gleiches gilt auch für die nachfolgenden Darstellungen).

Zeitraum	60 s	40 s	20 s
254_05 17-19 h	33 / 20 / 41	66 / 29 / 75	314 / 205 / 403
255_05 9.30-11.30h	9 / 13 / 17	9 / 14 / 17	9 / 14 / 18
255_05 17-19 h	32 / 20 / 41	183 / 87 / 209	334 / 183 / 399

Tabelle E-3: Mittlerer Positionsfehler (horizontal / vertikal / gesamt) [mm] für kleines Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

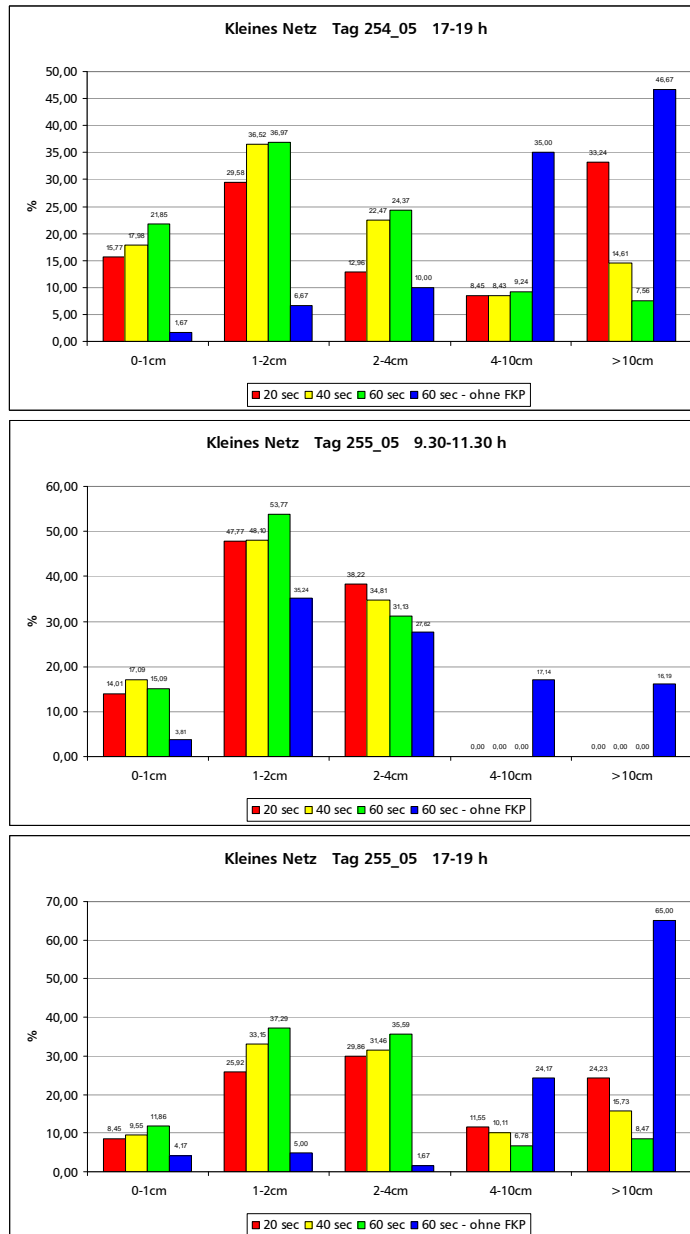


Abbildung E-1: 3D-Positionsfehler für kleines Teilnetz, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

Zeitraum	60 s	40 s	20 s
254_05 17-19 h	93,8 / 0 / 5,7 / 0,5	91,4 / 0 / 8,1 / 0,5	77,3 / 0 / 22,0 / 0,7
255_05 9.30-11.30h	100 / 0 / 0 / 0	100 / 0 / 0 / 0	99,9 / 0 / 0 / 0,1
255_05 17-19 h	96,1 / 0 / 3,9 / 0	91,6 / 0 / 8,3 / 0,1	81,3 / 0 / 18,6 / 0,1

Tabelle E-4: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linearkombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar) für kleines Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

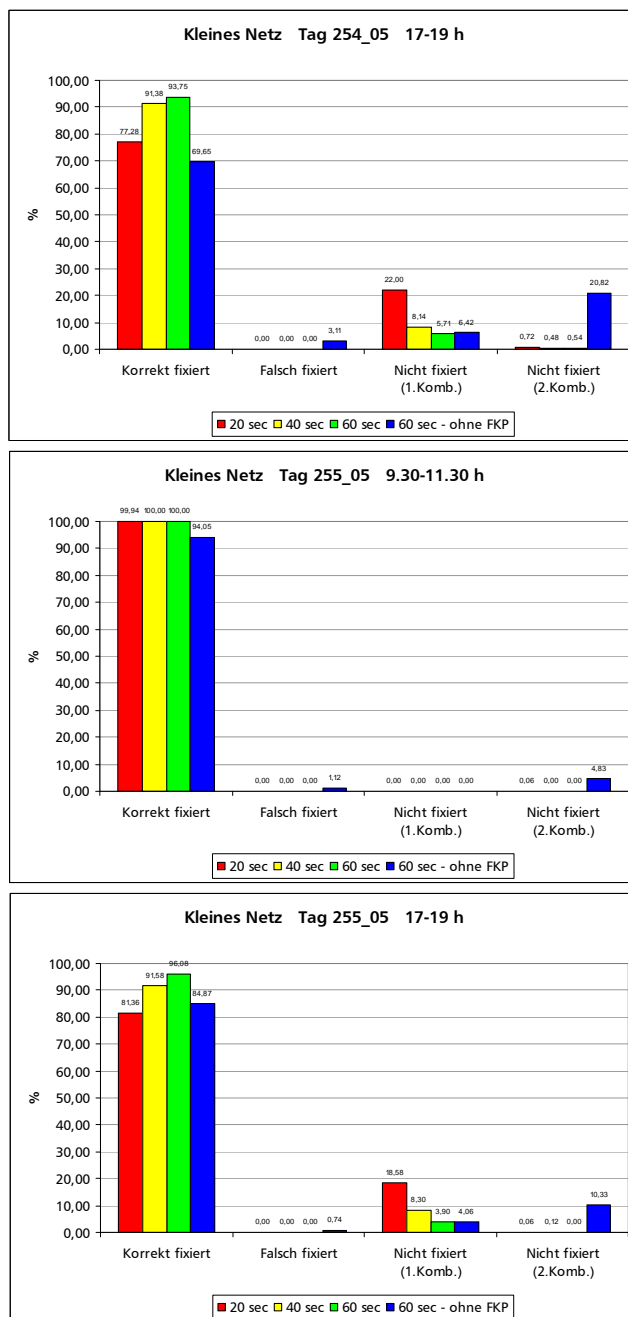


Abbildung E-2: Grafische Darstellung zu Tabelle E-4

Die Ergebnisse für das mittlere thüringische Teilnetz mit einer Basislinienlänge Rover

– nächstgelegene Referenzstation von 32 km sind bzgl. der mittleren Positionsfehler in Tabelle E-5 und Abbildung E-3 sowie bzgl. der Mehrdeutigkeitslösung in Tabelle E-6 und Abbildung E-4 dargestellt.

Zeitraum	60 s	40 s	20 s
254_05 17-19 h	227 / 145 / 271	29 / 24 / 39	265 / 167 / 326
255_05 9.30-11.30h	19 / 19 / 27	17 / 18 / 26	18 / 18 / 27
255_05 17-19 h	18 / 28 / 35	19 / 28 / 36	293 / 330 / 459

Tabelle E-5: Mittlerer Positionsfehler (horizontal / vertikal / gesamt) [mm] für mittleres Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

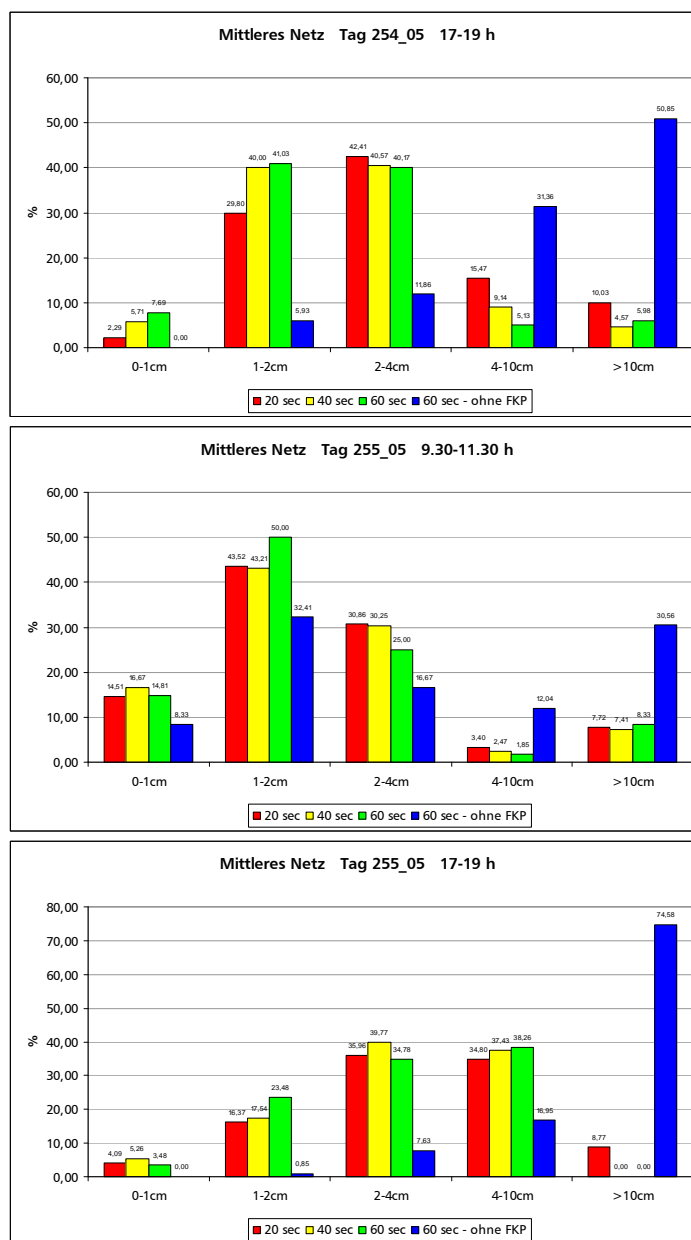


Abbildung E-3: 3D-Positionsfehler für mittleres Netz, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

Zeitraum	60 s	40 s	20 s
254_05 17-19 h	95,1 / 0 / 3,6 / 1,3	94,3 / 0 / 4,6 / 1,1	83,4 / 0,1 / 15,5 / 1,0
255_05 9.30-11.30h	98,2 / 0 / 0 / 1,8	98,4 / 0 / 0 / 1,6	98,2 / 0 / 0 / 1,8
255_05 17-19 h	96,8 / 0 / 3,2 / 0	95,5 / 0 / 4,5 / 0	85,7 / 0 / 14,2 / 0,1

Tabelle E-6: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linearkombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar) für mittleres Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

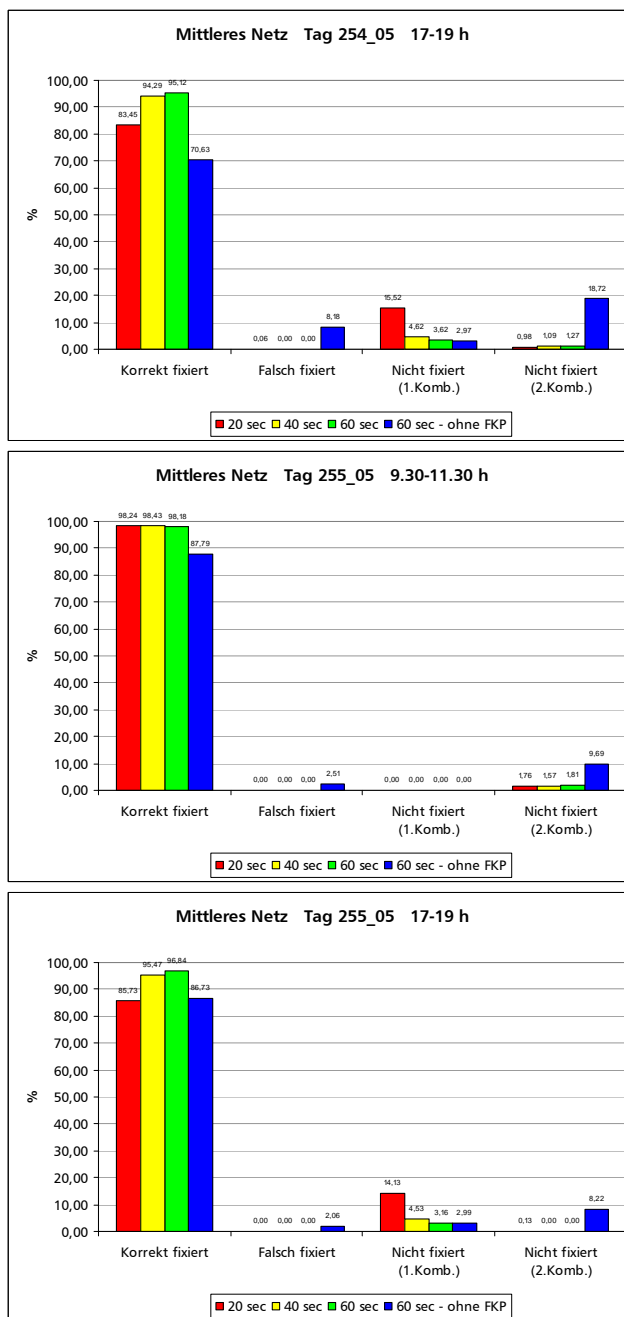


Abbildung E-4: Grafische Darstellung zu Tabelle E-6

Die Ergebnisse für das große thüringische Teilnetz mit einer Basislinienlänge Rover –

nächstgelegene Referenzstation von 58 km sind bzgl. der mittleren Positionsfehler in Tabelle E-7 und Abbildung E-5 sowie bzgl. der Mehrdeutigkeitslösung in Tabelle E-8 und Abbildung E-6 dargestellt.

Zeitraum	60 s	40 s	20 s
254_05 17-19 h	61 / 40 / 77	27 / 28 / 43	225 / 161 / 295
255_05 9.30-11.30h	102 / 105 / 150	117 / 123 / 174	129 / 137 / 197
255_05 17-19 h	80 / 163 / 163	116 / 202 / 236	291 / 233 / 409

Tabelle E-7: Mittlerer Positionsfehler (horizontal / vertikal / gesamt) [mm] für großes Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

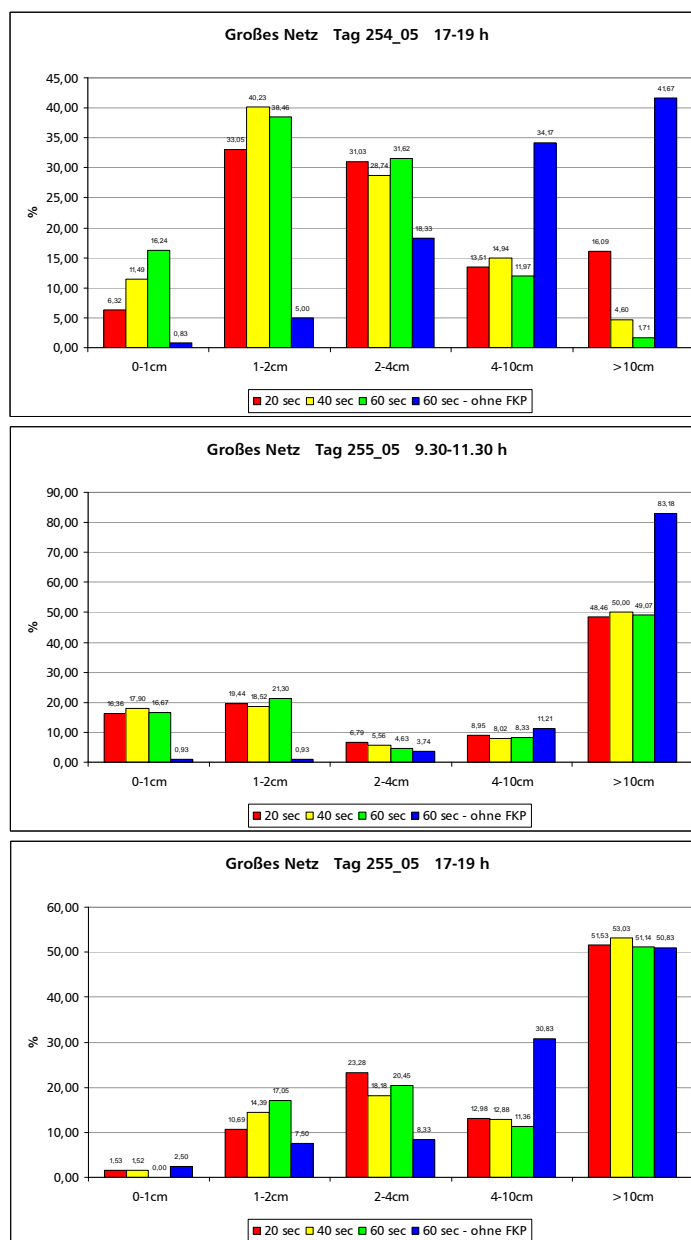


Abbildung E-5: 3D-Positionsfehler für großes Teilnetz, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

Zeitraum	60 s	40 s	20 s
254_05 17-19 h	95,1 / 0,5 / 2,0 / 2,4	93,0 / 0,5 / 3,7 / 2,8	81,6 / 0,6 / 14,6 / 3,2
255_05 9.30-11.30h	83,0 / 3,6 / 0 / 13,4	83,4 / 3,8 / 0 / 12,8	83,6 / 3,8 / 0 / 12,6
255_05 17-19 h	99,7 / 0 / 0,3 / 0	97,4 / 0 / 2,3 / 0,3	91,4 / 0 / 8,4 / 0,2

Tabelle E-8: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linearkombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar) für großes Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

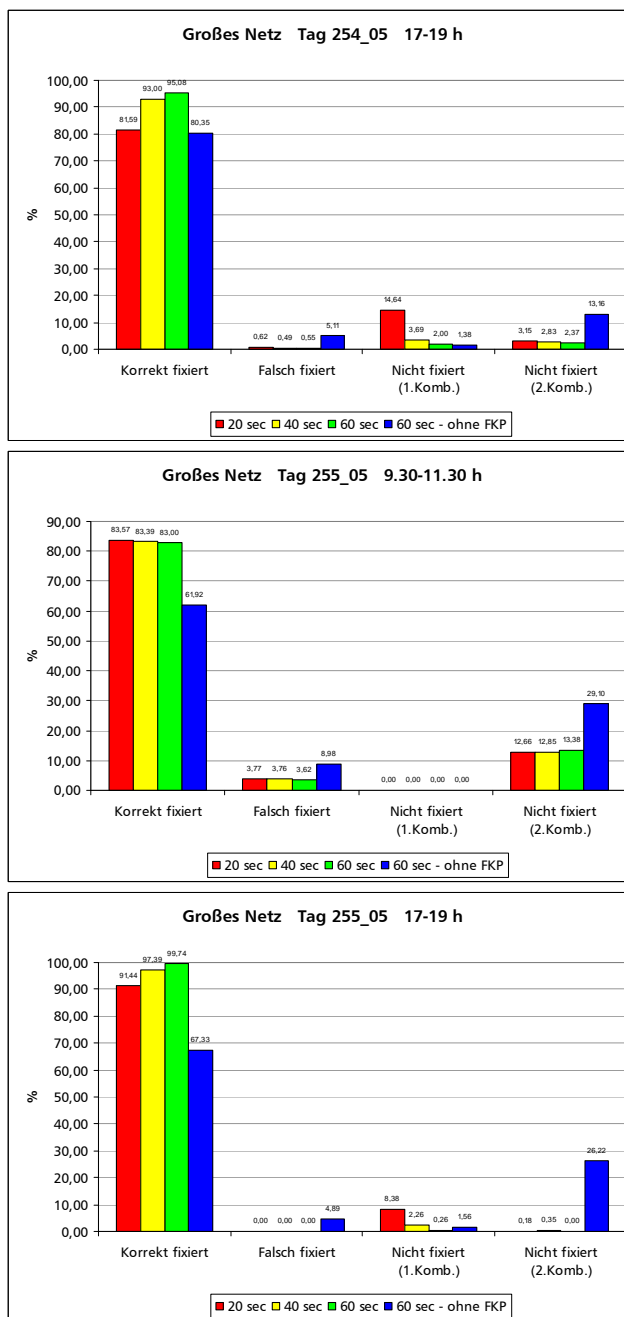


Abbildung E-6: Grafische Darstellung zu Tabelle E-8

Netz Bayern

Für das Teilnetz Bayern wurden lediglich Beobachtungsdaten von 12-18 h am 18. Mai 2006 im nördlichen Teilnetz ausgewertet. Für die PDGPS-Lösung bzw. die Mehrdeutigkeitsfixierung wurden 60 s, 40 s, 20 s sowie 10 s Intervalle herangezogen. Als a priori Korrekturmodell wurde für die Ionosphäre das Klobuchar-Modell und für die Troposphäre numerische Wettermodelle (NWM) verwendet. Die verbleibenden Restfehler wurden über zwei Flächenkorrekturparameter approximiert. Die Elevationsmaske beträgt 15°.

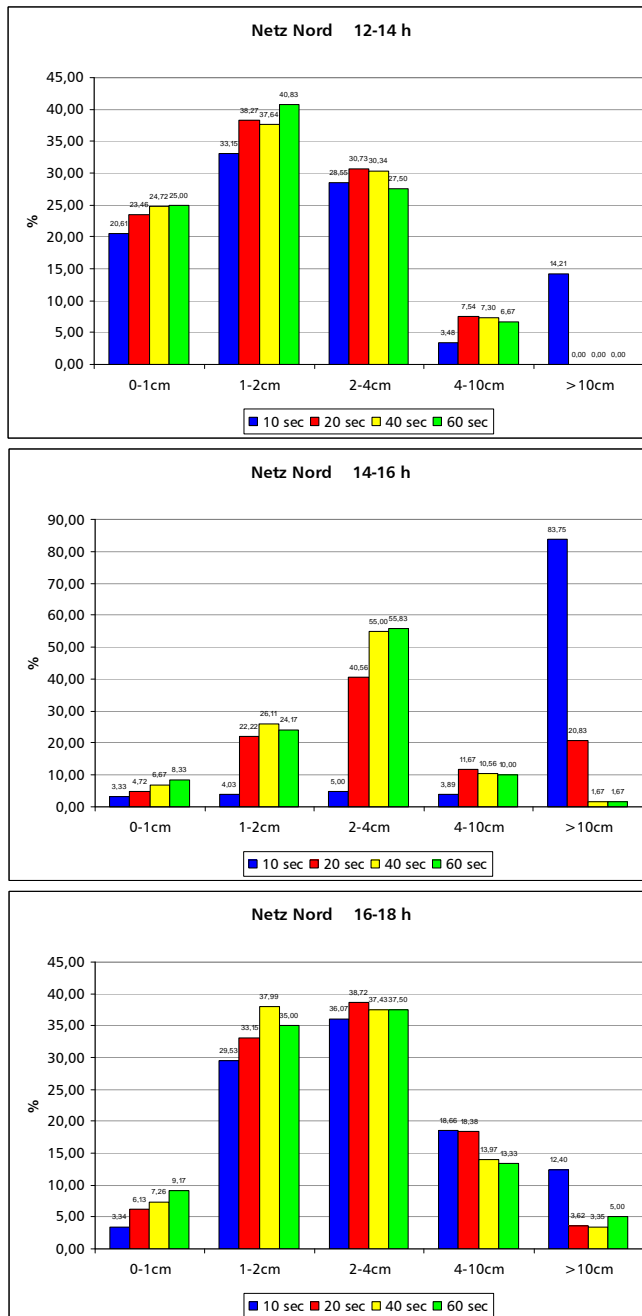


Abbildung E-7: 3D-Positionsfehler für nördliches bayerisches Teilnetz, eingeteilt in 5 Genauigkeitsklassen; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

Zeitraum	60 s	40 s	20 s	10 s
12-14 h	9 / 15 / 19	9 / 16 / 19	9 / 16 / 19	545 / 329 / 660
14-16 h	13 / 22 / 27	13 / 21 / 27	337 / 187 / 433	4088 / 1427 / 4567
16-18 h	17 / 23 / 30	17 / 23 / 30	18 / 25 / 32	114 / 144 / 186

Tabelle E-9: Mittlerer Positionsfehler (horizontal / vertikal / gesamt) für nördliches bayerisches Teilnetz [mm]; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

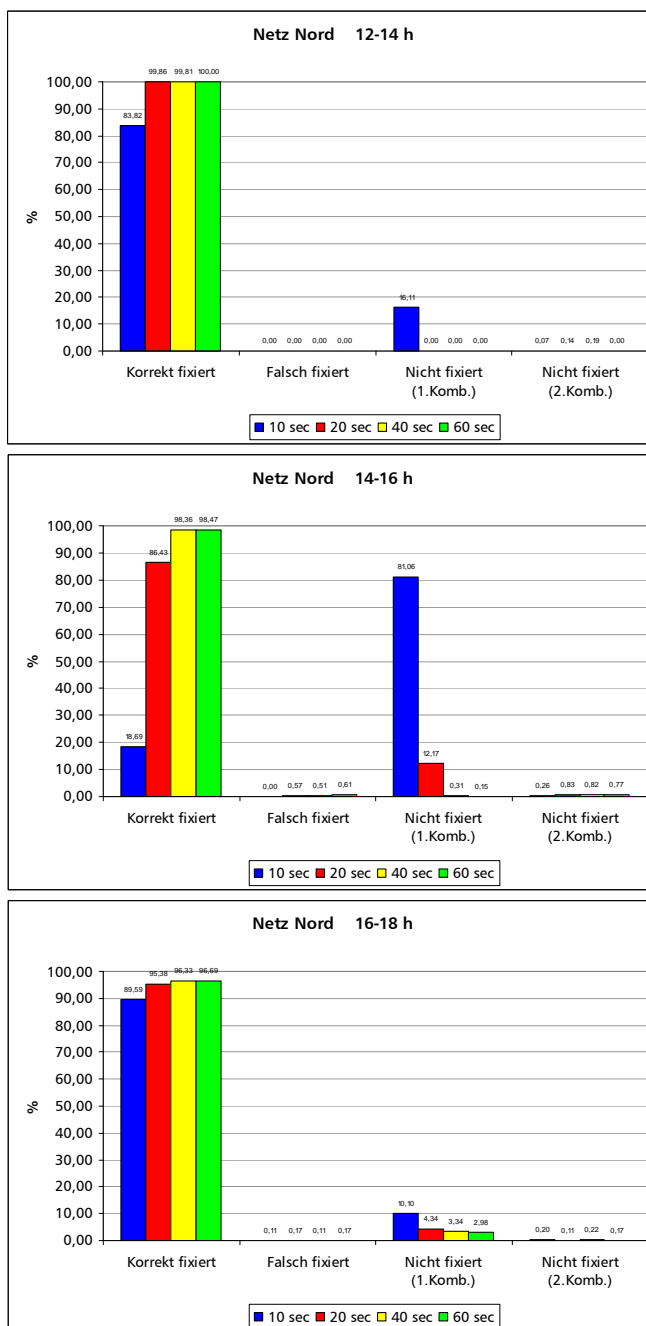


Tabelle E-10: Mehrdeutigkeitsfixierung für nördliches bayerisches Teilnetz; 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

Zeitraum	60 s	40 s	20 s	10 s
12-14 h	100 / 0 / 0 / 0	99,8 / 0 / 0 / 0,2	99,9 / 0 / 0 / 0,1	83,8 / 0 / 16,1 / 0,1
14-16 h	98,5 / 0,6 / 0,1 / 0,8	98,4 / 0,5 / 0,3 / 0,8	86,4 / 0,6 / 12,2 / 0,8	18,7 / 0 / 81,1 / 0,2
16-18 h	96,7 / 0,2 / 3,0 / 0,1	96,3 / 0,1 / 3,4 / 0,2	95,4 / 0,2 / 4,3 / 0,1	89,6 / 0,1 / 10,1 / 0,2

Tabelle E-11: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig / falsch / 1. (und u.U. 2.) Linearkombination nicht fixierbar / 2. Linearkombination nicht fixierbar); 2 Parameter; Ionosphärenmodell = Klobuchar, Troposphärenmodell = NWM; 15° cut-off

Lebenslauf

PERSÖNLICHE ANGABEN

Name Eva Schüler, geb. Krueger
Geburtsdatum 12. Februar 1972
Geburtsort Langen/Hessen
Familienstand verheiratet, 1 Sohn (geb. Dez. 2007)

SCHULBILDUNG

1978-1982 Wilhelm-Busch-Schule, Grundschule in Darmstadt
1982-1991 Ludwig-Georgs-Gymnasium in Darmstadt
10. Juni 1991 Allgemeine Hochschulreife

BERUFSAUSBILDUNG

1991-1992 Studium Geographie/Geschichte und Mathematik an der Technischen Hochschule Darmstadt
1992-1998 Studium Vermessungswesen an der Universität Karlsruhe (TH)
13. Oktober 1994 Vordiplom
5. Februar 1998 Diplom; Abschluss: Dipl.-Ing.
1998-2000 Vorbereitungsdienst für den höheren vermessungstechnischen Verwaltungsdienst, Bezirksregierung Lüneburg, Niedersachsen
30. Juni 2000 Große Staatsprüfung; Abschluss: Vermessungsassessorin

TÄTIGKEIT

1991-1992 Praktikum und Aushilfskraft bei ÖbVI Kolb in Darmstadt
1994-1998 Wissenschaftliche Hilfskraft am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe (TH)
09/2000-01/2008 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Erdmessung und Navigation der Universität der Bundeswehr München