

Nr. 245

VOLKER BÖDER

**Zur hochpräzisen
GPS-Positions- und Lagebestimmung
unter besonderer Berücksichtigung
mariner Anwendungen**

HANNOVER 2002

Nr. 245

**Zur hochpräzisen
GPS-Positions- und Lagebestimmung
unter besonderer Berücksichtigung
mariner Anwendungen**

Vom Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

DOKTOR - INGENIEUR

genehmigte Dissertation
von
Dipl.-Ing. Volker Böder

HANNOVER 2002

Referent: Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Hans Pelzer

Tag der mündlichen Prüfung: 28.06.2002

Zusammenfassung

In marinen Anwendungen werden zunehmend hochpräzise Positionen mit Genauigkeiten von etwa 3 cm gefordert. Gegenstand dieser Arbeit ist die hochpräzise GPS-Positionsbestimmung mit Zentimetergenauigkeit hinsichtlich des Einsatzes in einem mobilen, auf hydrographische Anwendungen ausgerichteten Multisensorsystem in Echtzeit. Durch die Reduzierung entfernungs- und stationsabhängiger Anteile des GPS-Fehlerhaushalts, durch Vernetzung und Kalibrierung von Referenzstationen und durch die Integration der Messdaten mit weiteren Sensoren werden nahezu alle Anforderungen an die Positionsbestimmung beispielsweise an den deutschen Küsten erfüllt.

Entfernungsabhängige Fehleranteile (Bahnfehler der Satelliten, atmosphärische Ausbreitungsverzögerungen der Messsignale) können die Genauigkeit der Koordinatenbestimmung um einige ppm (*parts-per-million*, 10^{-6}) in Abhängigkeit der Entfernung zur Referenzstation verschlechtern. Geometrische und ionosphärische Vernetzungsparameter (Flächenkorrekturparameter, FKP) werden in einem Referenzstationsnetz modelliert und als Korrekturen an die Messungen angebracht. Mit der Vernetzung reduzieren sich die entfernungsabhängigen Fehleranteile auf weniger als 1 ppm. Eine Vernetzung der deutschen Küstenregionen auf der Basis des existierenden Referenzstationsnetzes des SAPOS-Dienstes unter Hinzunahme weniger Stationen wird vorgeschlagen.

Stationsabhängige Fehleranteile (Phasenzentrumsvariationen der GPS-Antenne (PCV), Mehrwegeeffekte) können durch absolute Feldkalibrierungen mit Millimetergenauigkeit bestimmt werden. Für die vollständige Berücksichtigung der PCV-Kalibrierung auf mobilen Plattformen müssen die Kalibrierwerte mit den Lagewinkeln der Plattform zur Reduktion verknüpft werden. Desweiteren wird ein neues Verfahren zur absoluten Kalibrierung von GPS-Referenzstationen vorgestellt. Bei kalibrierten Stationseinflüssen und mit Vernetzung der Referenzstationen werden für kinematische Anwendungen in Echtzeit Positionsgenauigkeiten von 3 cm und besser in einem regionalen Referenzstationsnetz ermöglicht.

An Bord eines Messschiffes wird die GPS-Position üblicherweise zur Beschickung eines hydrographischen Sensors verwendet (Echolot). Die Lagebestimmung kann sowohl von Mehrantennensystemen als auch von inertialen Messeinheiten mit einer Genauigkeit von 0.1° und besser vorgenommen werden. Zusätzlich wird die Positionsgenauigkeit eines GPS gestützten INS hinsichtlich der Eignung zur Überbrückung von GPS Datenlücken untersucht. Die konzeptionelle Integration verschiedener Sensoren in einem gemeinsamen Messsystem wird abschließend vorgestellt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen und Entwicklungen insbesondere aus dem Bereich der Reduzierung der GPS-Fehleranteile sind nicht nur für den Einsatz in Multisensorsystemen von Belang, sondern können auf quasi stationäre Anwendungen (Pegelüberwachung, geodynamische und ingenieurtechnische Aufgabenstellungen) übertragen werden.

Schlagwörter: Global Positioning System (GPS), Hydrographie, Multisensorsystem, Positions- und Lagebestimmung in Echtzeit, Vernetzung, Stationskalibrierung, GPS/INS Integration.

Summary

In marine surveying an increasing number of applications requires position data with accuracies of better than 3 cm in real-time with regard to the operation in multi sensor environments. The reduction of the GPS error budget using active reference station networks and site calibration, and the data integration of various sensors fulfil all essential requirements of marine positioning, for example at the german coasts.

The main concept is based on real-time precise differential GPS positioning with carrier phase ambiguity resolution. The main errors in GPS positioning can be divided in station and distance dependent effects. Distance dependent errors like satellite orbit and atmospheric delays decrease the accuracy to several ppm (*parts-per-million*, 10^{-6}) of the distance between reference and rover station. Geometric and ionospheric parameters are modeled within an active reference station network. The use of FKP improves the accuracy of the GPS position to better than 1 ppm. An active reference station network along the German coastline is proposed considering existing permanent reference stations of SAPOS.

Station dependent errors like phase center variations (PCV) and multipath are determined by absolute field calibration procedures with millimeter accuracy. For the use on mobile platforms the PCV need to be transformed with the platform's attitude data. For multipath elimination a new absolute station calibration procedure using a moving robot is described. With both active reference station network and absolute station calibration an accuracy of better than 3 cm is achievable.

On board a marine survey vessel the GPS position needs usually to be transformed to an hydrographic sensor (e.g. echo sounder). In the described multi sensor system a GPS multi antennae system and inertial measurement units determine the ship's attitude with the required accuracy of 0.1° and better. In addition, the positioning accuracy of a GPS supported INS is investigated in order to examine the capabilities of GPS/INS integration and the bridging of GPS data gaps. A concept for such a multi sensor system is presented.

The results of the investigations and developments (in particular the reduction of the GPS error budget) benefit not only the use of GPS in kinematic but also in quasi static marine applications like geodynamics, tide gauge monitoring and engineering.

Keywords: Global Positioning System (GPS), hydrography, multi sensor system, real-time position and attitude determination, active GPS reference station network, station calibration, GPS/INS integration.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Anforderungen an die Positionsbestimmung für marine Anwendungen	5
2.1	Beschreibung der Anforderungen	5
2.1.1	Die Standards der <i>International Hydrographic Organization</i> (IHO)	6
2.1.2	Der Deutsche Funknavigationsplan	6
2.1.3	Nutzerumfrage bezüglich der Anforderungen an hydrographische Positionsbestimmungen	9
2.1.4	Aktuelle marine Forschungsschwerpunkte	10
2.2	Höhenbezugssysteme	11
2.3	Beschickung von Lotungsmessungen	13
2.4	Anforderungen an die Lagewinkelgenauigkeit für die Beschickung von Lotungsmessungen	15
2.5	Fazit	16
3	Präzise Positionsbestimmung mit GPS	17
3.1	Grundlagen zur Positionsbestimmung mit GPS	17
3.2	GPS-Fehlerhaushalt	19
3.3	Referenzstationsdienste	21
3.3.1	Datenformate und -übertragung für Anwendungen im Postprocessing	22
3.3.2	Datenformate für Anwendungen in Echtzeit	23
3.3.3	Datenübertragung für Anwendungen in Echtzeit	24
3.3.4	Beispiele für Referenzstationsdienste	25
3.4	GNSS-Echtzeit-Messsystem GNRT	28
3.4.1	Betriebssystem OS/2	28
3.4.2	Kernmodule des Messsystems	29

4	Entfernungsabhängige Fehleranteile der GPS-Positionsbestimmung	31
4.1	Einflüsse der Atmosphäre	31
4.1.1	Ionosphäre	32
4.1.2	Troposphäre	34
4.2	Einflüsse des Raumsegmentes	35
4.3	Reduzierung entfernungsabhängiger Fehleranteile	36
4.3.1	Virtuelle Referenzstationen (VRS)	36
4.3.2	Flächenkorrekturparameter (FKP)	37
4.3.3	Datenfluss-Konzepte für Multistationslösungen in Echtzeit	39
5	Untersuchungen zur Reduzierung entfernungsabhängiger Fehleranteile	41
5.1	Voruntersuchungen zur präzisen GPS Positionsbestimmung	41
5.2	Vernetzung von Referenzstationen unter SA-Einfluss	47
5.3	Vernetzung von Referenzstationen während des Sonnenzyklus 23	51
5.4	Vorschlag zur Vernetzung im Bereich der Nord- und der Ostsee	57
5.5	Fazit	59
6	Stationsabhängige Fehleranteile der GPS-Positionsbestimmung	61
6.1	Variationen der Phasenzentren der Empfängerantennen	61
6.1.1	Antennenkalibrierungen	62
6.1.2	Auswirkungen der PCV in Referenzstationsnetzen	65
6.1.3	Auswirkungen der PCV auf bewegten Plattformen	66
6.1.4	Fazit	71
6.2	Der Mehrwegeeinfluss	72
6.2.1	Reflexion	72
6.2.2	Auswirkung des Mehrwegeeffektes	73
6.2.3	Nachweis des Mehrwegeeffektes auf Trägerphasenmessungen	75
6.2.4	Diffraktion	79
6.2.5	Entgegenwirkende Maßnahmen	80
6.3	Das Hannoversche Verfahren zur Absoluten Stationskalibrierung	81
6.3.1	Roboterarme am Institut für Erdmessung	81
6.3.2	Dekorrelation des Multipath auf der Roboterstation	82
6.3.3	Modellierung und Anbringung der Korrektur	85
6.3.4	Untersuchungsergebnisse	87

6.3.5	Zukünftige Weiterentwicklung des Verfahrens	87
6.3.6	Fazit	90
6.4	Echtzeiterfordernisse bei Absoluter Antennen- und Stationskalibrierung	91
7	Nutzung von GPS und INS in einem hydrographischen Messsystem	92
7.1	GPS-Geschwindigkeiten	93
7.2	Lagebestimmung mit einem GPS-Mehrantennensystem	93
7.3	Positions- und Lagebestimmung mit inertialen Messsystemen	97
7.3.1	Grundlagen inertialer Messsysteme	97
7.3.2	Genauigkeitsanforderungen an inertielle Messsysteme	102
7.3.3	Integration von GPS und inertialer Messtechnik	103
7.3.4	GPS-gestützte IMS Positions- und Lagebestimmung (Litef LCR-88)	105
7.3.5	Zeitliche Synchronisation der GPS- und INS-Daten	107
7.4	Untersuchungen zur GPS-Lagewinkelbestimmung	109
7.4.1	Vergleich mit inertialen Messeinheiten	109
7.4.2	Zusammenfassende Betrachtungen	113
7.5	Untersuchungen zur GPS gestützten INS Positionsbestimmung	114
7.6	Integration der Messdaten in Echtzeit	119
7.7	Fazit	121
8	Zukünftige Entwicklungen der GNSS-Systeme	123
8.1	Das NAVSTAR Global Positioning System (GPS)	123
8.2	Das GLObal NAVigation Satellite System (GLONASS)	124
8.3	Europäische Alternativen zu GPS: EGNOS und Galileo	125
8.3.1	GNSS-1/EGNOS	125
8.3.2	GNSS-2/Galileo	126
8.4	Loran-C/EUROFIX	128
9	Zusammenfassung und Ausblick	130

Abbildungsverzeichnis

2.1	Zeitliche Systemplanungen für ausgewählte Funknavigationssysteme laut [DFNP 1999].	8
2.2	Höhenbezugssysteme an Deutschen Küsten.	12
2.3	Prinzipskizze zur indirekten Beschickung über Pegelmessungen.	13
2.4	Prinzipskizze zur direkten Beschickung mit GPS-Verfahren.	14
2.5	Reduzierung einer GPS-Position auf einen hydrographischen Sensor.	15
3.1	Ablaufdiagramm des Echtzeit-Programmpakets GNRT.	30
4.1	Ausbreitungsverzögerungen in der Atmosphäre.	32
4.2	Anzahl der Sonnenflecken seit 1845.	33
4.3	Lineare Modellierung der FKP für zwei Referenzstationen nach [Wübbena 1998].	37
4.4	Lineare Modellierung der FKP für drei Referenzstationen.	38
4.5	Konzepte zur Realisierung von Multistationslösungen in Echtzeit.	39
5.1	Erfolgsquoten verschiedener Mehrdeutigkeitssuchalgorithmen im Postprocessing.	42
5.2	Erfolgsquoten bei der Mehrdeutigkeitsbestimmung im Postprocessing. <i>VWFS WEGA</i>	44
5.3	Höhendifferenzen zweier GPS-Lösungen über verschiedene Referenzstationen. <i>VWFS WEGA</i>	44
5.4	Modellierte Driftparameter der Satellitenbahnen bei Vernetzungssimulation.	46
5.5	Vergleich einer RTK-Messung mit einer Vernetzungssimulation, Hamburg.	46
5.6	Vergleich zwischen unvernetzten und vernetzten Echtzeitlösungen unter SA-Einfluss.	49
5.7	Darstellung der FKP aus den Untersuchungen unter SA-Einfluss.	50
5.8	Übersicht über die Lage der Referenz- und Roverstationen im Referenznetz der LGN Niedersachsen. Simulation eines potentiellen Nordseenetzes.	53
5.9	Ergebnisse zur Vernetzung zum Zeitpunkt eines Maximums der Sonnenaktivitäten.	55
5.10	Darstellung der FKP zur Zeit eines Maximums der Sonnenaktivitäten.	56
5.11	Mögliche Verteilung von vernetzten Referenzstationen an Nord- und Ostsee.	59
6.1	Bezugspunkte der GPS-Messungen.	62
6.2	Auswirkung der PCV ohne Offset bei Anbringung von Kalibrierungen ohne Lagewinkel.	69
6.3	Auswirkung nicht berücksichtigter Neigungen und Drehungen bei Reduzierung auf den ARP.	70

6.4	Prinzip der Mehrwegeausbreitung bei spiegelnder Reflexion.	74
6.5	L_1 -Doppeldifferenzen zweier aufeinanderfolgender Tage und ihre Differenzen.	76
6.6	Signal/Rausch-Verhältnisse zweier aufeinanderfolgender Tage und deren Differenzen.	76
6.7	Doppeldifferenzen und siderische Tagesdifferenzen bei verschiedenen Wetterlagen.	78
6.8	Zusammenhang zwischen empfangener Feldstärke und Abstand einer Beugungskante von der direkten Sichtverbindung.	79
6.9	Roboterarm zur Absoluten Antennen- und Stationskalibrierung.	82
6.10	Simulation zur Dekorrelation des Multipath durch Bewegung der Empfangsantenne.	83
6.11	Dekorrelation des Multipath durch schnelle Roboter-Bewegungen. Doppeldifferenzen.	84
6.12	Dekorrelation des Multipath durch schnelle Roboter-Bewegungen. Tagesdifferenzen.	84
6.13	Simulation der Stationsdifferenz einer Multipath-dekorrelierten Station.	86
6.14	Darstellung der Multipath-Korrekturen über Azimut und Elevation in einem <i>sky plot</i>	86
6.15	Doppeldifferenzen ohne und mit Stationskalibrierung. Einzeldifferenzen der Satelliten.	88
6.16	Koordinatendifferenzen L_1 zum Soll ohne und mit Stationskalibrierung.	89
7.1	Schiffs-Lagebestimmung mit einem GPS-Mehrantennensystem. Reduzierung einer GPS-Position auf einen Schwinger (engl.: <i>echo sounder</i>).	94
7.2	Schiffs-Lagebestimmung mit einem Zwei-Antennensystem. α : Kurs, γ : Neigung.	95
7.3	Koordinatensysteme der Inertialmessung.	99
7.4	Prinzipsskizzen zu Beschleunigungsmessern und technischen Kreiseln.	100
7.5	Mögliche Anordnung der Komponenten in einem INS.	101
7.6	Schulerschwingungen in Geschwindigkeit, Lagewinkel und Position eines INS.	103
7.7	Hebelarm-Komponenten für die Transformation zwischen GPS und IMS.	104
7.8	Stützung des LCR-88 mit einer präzisen DGPS-Lösung in Echtzeit.	107
7.9	Synchronisation der GPS- und der inertialen Messungen.	108
7.10	Kurvenfahrt und "Normale Messfahrt" mit dem <i>VWFS Deneb</i> des BSH.	111
7.11	Kurvenfahrt mit dem <i>VWFS Deneb</i> : Differenzen verschiedener Lagemesssysteme.	111
7.12	Normale Messfahrt mit dem <i>VWFS Deneb</i> : Differenzen verschiedener Lagemesssysteme.	112
7.13	Zusammenfassung der Untersuchungen zur Genauigkeit der Lagewinkelbestimmung.	113
7.14	Position und Lagewinkel einer Messfahrt mit dem <i>VS Greif</i>	115
7.15	INS-Rohdaten einer Messfahrt mit dem <i>VS Greif</i>	115
7.16	Differenzen zwischen GPS- und INS-Position bei Simulation von Datenlücken.	116
7.17	Auswirkungen von GPS-Datenlücken auf die INS-Positionsbestimmung (Simulation).	117
7.18	Schulerschwingungen in der Position für 20 s des LCR88.	118
7.19	Zusammenführung der Positions- und Lagedaten zur Nutzung in einem hydrographischen Messsystem.	119

Tabellenverzeichnis

2.1	Mindeststandards der IHO.	6
2.2	Auszüge aus den Nutzeranforderungen des Deutschen Funknavigationsplanes.	7
2.3	Genauigkeitsanforderungen an ein Positionsbestimmungssystem für hydrographische Anwendungen. Nutzerumfrage des Instituts für Erdmessung.	9
2.4	Komponenten der Schiffsbewegungen.	14
2.5	Horizontale (dX) und vertikale (dZ) Abweichungen bei der Transformation von GPS-Antenne auf einen Zielsensor.	16
3.1	Wesentliche GPS-Fehlerquellen und ihre Auswirkung auf die Strecken der Trägerphasenmessungen.	20
3.2	Funktionale und stochastische Beschreibung der GPS-Fehlerquellen.	21
3.3	Auswahl von Nachrichtentypen des RTCM 2.3-Formats.	23
3.4	Gängige terrestrische Datenübertragungskanäle nach [Wübbena und Bagge 1995].	25
3.5	Genauigkeiten der IGS-Produkte.	26
3.6	Leistungskriterien der SAPOS-Servicebereiche nach [Hankemeier und Engel 1998].	28
4.1	Konzepte zur Realisierung von Multistationslösungen in Echtzeit.	40
5.1	Erfolgsquoten bei der Lösung von Mehrdeutigkeiten im Postprocessing.	43
5.2	Übersicht über Ausstattung der Referenzstationen und Entfernung zum Messgebiet Otterbergen. Testnetz Südniedersachsen.	48
5.3	Vergleich zwischen unvernetzten und vernetzten Echtzeitlösungen unter SA-Einfluss. Otterbergen.	48
5.4	Übersicht über die Ausstattung der Referenz- und Roverstationen und der Lage in einem simulierten Nordseenetz.	52
5.5	Ergebnisse der Untersuchungen zum Zeitpunkt eines Maximums der Sonnenaktivitäten.	54
6.1	Verwendung verschiedener Antennenkalibriersätze in kinematischer Anwendung.	67
6.2	Auswirkung der PCV: Antennentypen mit Offsets aus absoluten Kalibrierungen.	68
6.3	Auswirkung der PCV ohne Offset bei Anbringung von Kalibrierungen ohne Lagewinkel.	69
6.4	Auswirkung der PCV mit Offset bei Anbringung von Antennenkalibrierungen ohne Lagewinkel.	70
6.5	Überblick über den wetterbedingten Zustand der Umgebung.	78

6.6	Standardabweichungen ausgewählter Doppeldifferenzen zur Untersuchung der Wetterabhängigkeit des Multipath.	78
6.7	Dekorrelation des Multipath: Standardabweichungen der Residuen ausgewählter Doppeldifferenzen auf Roboterstationen.	84
6.8	Stationskalibrierung: Standardabweichungen der Residuen von Doppeldifferenzen.	88
6.9	Stationskalibrierung: Standardabweichungen der Koordinaten der Station 1000 mit und ohne Kalibrierung.	88
7.1	Abschätzung der erreichbaren Winkelauflösung $d\gamma$ aus der Basislänge s in einem Zweiantennensystem.	96
7.2	Anforderungen an inertielle Sensoren in Abhängigkeit ihrer Anwendung. [Bäumker 1995].	102
7.3	Kenndaten des AHRS LCR-88 von Litef [Bäumker 1995].	106
7.4	Genauigkeiten des TSS POS/MV 320.	110
7.5	Auswirkungen von GPS-Datenlücken auf die INS-Positionsbestimmung (Simulation).	116
7.6	Zusammenfassung zur Nutzung der INS-Positionsbestimmung mit dem LCR-88.	117
7.7	Auswirkungen der Schulerschwingung durch Beschleunigungsmesser-Bias und Kreiseldrift auf die Genauigkeit der Positionslösung.	118
8.1	Leistungsparameter der Galileo-Dienste nach [Weber und Schäfer 2001].	127
8.2	Verfügbarkeit und Integrität der Positionsinformationen des Eurofix-Systems. [Kügler 1999].	129

Abkürzungsverzeichnis

AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Bundesrepublik Deutschland
AHRS	Attitude and Heading Reference System
ARP	Antenna Reference Point (Antennen-Referenz-Punkt)
A-S	Anti-Spoofing
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg
BMVBW	Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen, Berlin
CAS	Controlled Access Service
DFNP	Deutscher Funknavigationsplan
DD	Double Difference (Doppeldifferenz)
DoD	Department of Defense, USA
DGPS	Differential GPS
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
ESA	European Space Agency
ETRF/ETRS	European Terrestrial Reference Frame / System
FOC	Full Operational Capability
FRNP	Federal Radionavigation Plan
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication
IALA	International Association of Marine Aids and Lighthouse Authorities
IERS	International Earth Rotation Service
IFE	Institut für Erdmessung, Hannover
IGN	Institute Geographique National, Paris
IGS	International GPS Service
IHO	International Hydrographic Organization
IMO	International Maritime Organization
IMS/IMU	Inertiales Messsystem / Inertial Measuring Unit
INS	Inertiales Navigationssystem / Inertial Navigation System
ITRF/ITRS	International Terrestrial Reference Frame / System
JPL	Jet Propulsion Laboratory, USA
LAAS/LADGPS	Local Area Augmentation System / Local Area DGPS
LGN	Landesvermessung+Geobasisinformationen Niedersachsen, Hannover
LORAN	Long Range Navigation
MSpNW	Mittleres Springtiden Niedrigwasser
NAVSTAR	NAVigation System for Timing and Ranging
NELS	Northwest Europe Loran-C System
NGS	National Geodetic Survey, USA
NHN	Normalhöhennull
NMEA	National Marine Electronics Association
OAS	Open Access Service
OTF	On-The-Fly
PCV	Phase Center Variations (Phasenzentrumsvariationen)
PDGPS	Präzises DGPS
PPS	Precise Positioning Service
PPS	Pulse Per Second
RADAR	Radio Detection and Ranging
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
RINEX	Receiver Independent Exchange Format

RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real-Time-Kinematic
SA	Selective Availability
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
SD	Single Difference (Einfachdifferenz)
SKN	Seekartennull
SPS	Standard Positioning Service
TTFa	Time To Fix Ambiguities
UTC	Coordinated Universal Time
WAAS/WADGPS	Wide Area Augmentation System / Wide Area DGPS
WGS84	World Geodetic System 1984
2-D/3-D	2-dimensional/3-dimensional

Kapitel 1

Einleitung und Zielsetzung

Die Schifffahrt ist seit jeher auf eine sichere Navigation angewiesen. In küstennahen Bereichen verlässt man sich heute noch auf das Auge des Schiffsführers, bestenfalls unterstützt durch RADAR. Die Fahrwasser sind mit Tonnen ausgeschildert, an Land bieten Leuchfeuer und Baken einen sicheren Anhalt für die Schiffsführung. Anlegemanöver in Häfen werden üblicherweise visuell überwacht. Als Hilfsmittel zur Positionsbestimmung kommen Funknavigationssysteme zum Einsatz.

Der Nachfrage nach permanenter Positionsbestimmung im Meeresbereich wurde bereits Ende des 2. Weltkriegs zunächst im Küstengebiet mit dem Funkhyperbelverfahren DECCA Rechnung getragen. Weitere terrestrische Funknavigationssysteme wie SYLEDIS, HiFix, Omega und LORAN-C kamen seitdem hinzu. In immer stärkerem Maße traten die terrestrischen Funkhyperbelverfahren in den achtziger und neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts zu Gunsten der satellitengestützten Verfahren *NAVSTAR Global Positioning System* (GPS) und *Global Navigation Satellite System* (GLONASS) in den Hintergrund. Die Satellitennavigationsverfahren GPS und GLONASS sind in der Regel permanent global verfügbar. Die unter normalen Umständen für jeden Nutzer verfügbaren Genauigkeiten der Verfahren von einigen Metern, die mit der alleinigen Auswertung der Codemessungen erreicht werden, sind für einen Großteil der Navigationsanwendungen ausreichend. Für Navigationsanwendungen mit Metergenauigkeit werden meist die Korrekturdaten von Referenzstationsdiensten genutzt.

Die Positionsbestimmung erfordert bei einigen marinen Anwendungen höhere Genauigkeiten im Bereich von Zenti- oder Dezimetern (siehe Kapitel 2). Dies gilt insbesondere für die Höhenkomponente, die in der Regel die hauptsächliche Zielgröße bei marinen Vermessungen darstellt. Für geodynamische Fragestellungen (Küstenhebungen) und Ingenieur Anwendungen (Bauwerksüberwachung) können auch Millimetergenauigkeiten notwendig sein. Die Nutzung satellitengestützter Verfahren findet seit geraumer Zeit in diesen Bereichen Eingang. Die Auswertung der mehrdeutigen Trägerphasen mit Modellierung und Reduzierung des Fehlerbudgets der Satellitenmessungen zum großen Teil durch Beobachtungen auf koordinatenmäßig bekannten Referenzstationen ist hierfür erforderlich. Die Ermittlung der Position in Echtzeit wird unter anderem aus Gründen der Wirtschaftlichkeit gewünscht oder kann in Ingenieur Anwendungen notwendig sein.

Problemstellungen

Die bisher gängigste Vorgehensweise für die hochpräzise GPS-Positionsbestimmung in Echtzeit ist die Verwendung von *Real-Time-Kinematic*-Systemen (RTK) mit einer Referenzstation und einer oder mehreren mobilen Einheiten (Rover). Die Leistungsfähigkeit dieser Systeme im Nahbereich von wenigen Kilometern ist groß und erfüllt viele Anforderungen. Jedoch wirken Fehler in der

Modellierung der Satellitenbahnen und atmosphärischen Ausbreitungsverzögerungen der Signale entfernungsabhängig auf die Genauigkeit und Sicherheit der Positionsbestimmung. Die Gesamtgröße entfernungsabhängiger Fehler hängt unter anderem von den Ausbreitung der GPS-Signale in der Ionosphäre ab. Eine erhöhte Anzahl der Sonnenflecken ist ein Zeichen für verstärkte Aktivitäten in den oberen Schichten der Sonne, die auch Einfluss auf das Verhalten der Ionosphäre der Erde haben. Die Anzahl variiert im Allgemeinen in einem etwa elf Jahre währenden Zyklus. Besonders in Zeiten mit starken ionosphärischen Störungen sind die für hohe Genauigkeitsanforderungen möglichen Distanzen zwischen Referenz- und Roverstation auf 1 km bis maximal 5 km beschränkt. In marinen Anwendungen sind die zu vermessenden Gebiete meist größer, so dass eine einzelne Referenzstation nicht mehr ausreicht. Desweiteren ist die Verfügbarkeit von Referenzstationen auf offener See durch fehlende feste Installationsmöglichkeiten beschränkt. Die Nutzung der hochpräzisen GPS-Positionsbestimmung ist somit auf kleine Messgebiete in Küstennähe beschränkt.

Weitere Einschränkungen der Positionsgenauigkeit sind durch die stationsabhängigen Fehleranteile der Phasenzentrumsvariationen der Empfängerantennen (engl.: *phase center variations*, PCV) und der Mehrwegeeffekte auf Referenz- und Roverstationen gegeben. Auswirkungen in der Größenordnung von mehreren Zentimetern in Abhängigkeit von der Umgebung und der eingesetzten Messausrüstung können für die Trägerphasenlösungen auftreten. In typischen RTK-Anwendungen werden die Einflüsse der PCV durch die Verwendung baugleicher Antennen reduziert. Unter der Voraussetzung, dass die PCV identisch sind und die Antennen gleich im WGS84 orientiert sind, wird der Einfluss der PCV durch Differenzbildung zwischen den Stationen eliminiert. Dies gilt nicht, wenn Abweichungen in den Baureihen auftreten oder wenn die mobile Nutzerantenne gegenüber der Referenzstationsantenne gedreht und geneigt wird, wie es in kinematischen Messungen an Bord eines Messschiffes üblicherweise der Fall ist. Desweiteren werden zur Minimierung der Mehrwegeeffekte (engl.: *multipath*) auf Referenzstationen spezielle Antennenbauweisen verwendet, die auf der Roverseite meist nicht eingesetzt werden. Die Unterschiede in den Bauweisen können wiederum Effekte von wenigen Zentimetern verursachen.

Der Multipath auf den Referenzstationen kann durch die Antennenbauweisen nur eingeschränkt reduziert werden. Auf Referenzstationen werden oftmals große Grundplatten und *choke ring* Antennen eingesetzt, die die Reflektionen von unterhalb des Antennenhorizontes minimieren sollen. Für Reflektoren oberhalb des Antennenhorizontes wirken diese Maßnahmen nicht. Zur Stationskalibrierung der verbleibenden Resteffekte sind keine operationellen absoluten Verfahren bekannt.

Die Verfügbarkeit der GPS-Position kann beispielsweise durch Abschattungen an der Empfangsantenne, durch einen kurzzeitigen Ausfall oder Störung einer GPS-Komponente oder durch Ausfall des Korrekturdatenempfangs von der Referenzstation gestört sein. Geeignete inertielle Navigationssysteme (INS) liefern Positionen, die in der Kombination mit GPS für kurze Zeit Genauigkeiten von wenigen Zentimetern erreichen und zur Stützung der Positionsbestimmung in einem kombinierten System herangezogen werden können. Die Positionen ungestützter INS driften je nach Leistungsfähigkeit der eingesetzten Komponenten unterschiedlich stark. Weiterhin ist an Bord eines Messschiffes weniger die Position der GPS-Antenne von Interesse als vielmehr die Position beispielsweise eines hydrographischen Sensors (z.B. Echolot). Die Empfangsantenne ist meist im Mast angebracht, während sich der Schwinger des Echolotes üblicherweise am Rumpf eines Bootes befindet. Zur Transformation der Antennenposition ist die Kenntnis der Schiffslagewinkel Kurs, Rollen und Stampfen erforderlich. Als Lagemesssysteme kommen sowohl Einheiten in Betracht, die auf GPS basieren, als auch solche, die inertielle Sensoren verwenden. Eine Kombination der Systeme ist für die Positions- und für die Lagebestimmung sinnvoll.

Auf Messschiffen sind üblicherweise bereits verschiedene Sensoren zur Positions- und Lage-

bestimmung installiert. Die Einbindung von Sensoren unterschiedlicher Herkunft in ein gemeinsames Messsystem wird im Allgemeinen nicht von den Herstellern angeboten und kann deshalb oftmals nicht zur Stützung herangezogen werden.

Zielsetzungen

Schwerpunkt dieser Arbeit ist die regionale, hochpräzise GPS-Positionsbestimmung mit Zentimetergenauigkeit hinsichtlich des Einsatzes in einem mobilen, auf hydrographische Anwendungen ausgerichteten Multisensorsystem in Echtzeit.

Es wird untersucht, inwiefern die Genauigkeit und Verfügbarkeit der GPS-Positionsbestimmung durch die Reduzierung entfernungsabhängiger Fehleranteile mit Hilfe regionaler, vernetzter Referenzstationsnetze und durch das Anbringen von GPS-Antennenkalibrierungen, insbesondere auf bewegten Messplattformen, verbessert werden kann. Ein neues Verfahren zur absoluten Kalibrierung von stationären GPS-Punkten wird vorgestellt.

Weiterhin werden verschiedene inertielle Sensoren hinsichtlich ihrer Eignung zur Positions- und Lagebestimmung zur Überbrückung von GPS-Datenlücken bzw. zur Reduzierung der GPS-Position auf einen Zielsensor untersucht. Die konzeptionelle Integration verschiedener Sensoren wird abschließend vorgestellt.

Die Untersuchungen und Entwicklungen insbesondere aus dem Bereich der Reduzierung der GPS-Fehleranteile sind nicht nur für den Einsatz in Multisensorsystemen von Belang, sondern können auf quasi stationäre Anwendungen (z.B. Pegelüberwachung, geodynamische und ingenieurtechnische Aufgabenstellungen) übertragen werden.

Gliederung

Die Anforderungen an die Positionsbestimmung in marinen Anwendungen werden in Kapitel 2 beschrieben. Um Zentimetergenauigkeiten zu erreichen, müssen die Fehlereinflüsse auf die Positionsbestimmung reduziert beziehungsweise für Korrekturen modelliert werden. Grundlagen der Fehlereinflüsse der GPS-Positionsbestimmung und zu deren Modellierung und Reduzierung wird in Kapitel 3 beschrieben. Die Modellierung und Reduzierung gelingt über die Nutzung von differentiellen Verfahren (*Differential GPS*, DGPS) mit Referenzstationen auf koordinatenmäßig bekannten Punkten.

Die entfernungsabhängigen Fehleranteile der satellitengestützten Positionsbestimmung, auf die in Kapitel 4 detaillierter eingegangen wird, können durch den Einsatz mehrerer vernetzter Stationen, die das Messgebiet umgeben, in Echtzeit reduziert werden. Es werden Vorgehensweisen zur Umsetzung der Vernetzung in Echtzeit beschrieben. Die Auswirkungen auf die GPS-Positionsbestimmung und die Reduzierung der Fehlereinflüsse werden zu unterschiedlichen Zeitpunkten beziehungsweise Zuständen der ionosphärischen Aktivitäten untersucht. Ein Teil der untersuchten Daten werden zusätzlich durch den Systembetreiber mit der Systemsicherungstechnik *selective availability* (SA) verfälscht. Die künstlichen Veränderungen der Uhr- und Bahnparameter der Satelliten wirken sich ebenfalls entfernungsabhängig aus. Laut [Clinton 2000] wird diese Technik in Zukunft bei dem GPS nicht mehr aktiviert und in neuen Satellitendesigns nicht mehr implementiert werden.

Die Untersuchungen geben Erkenntnisse über den Abstand vernetzter Referenzstationen, die als Grundlage für eine Netzplanung an der deutschen Nord- und Ostseeküste in Abschnitt 5.4 verwendet werden. Die Netzplanung schließt die wichtigsten Messgebiete an deutschen Küsten (z.B. Schifffahrtsrouten, Wattgebiete) ein. Es werden bestehende Referenzstationen aus dem Netz des *Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung* (SAPOS) berücksichtigt. Die günstige Lage von Helgoland in der Deutschen Bucht wirkt sich positiv auf die Planung an

der Nordseeküste aus. An der Ostsee ist eine Zusammenarbeit mit anderen Anrainern sinnvoll.

Für eine möglichst weitreichende Modellierung der Fehlereinflüsse sowohl auf den Referenzstationen als auch auf den mobilen Messstationen ist eine Berücksichtigung stationsabhängig wirkender Effekte wie Phasenzentrumsvariationen der Empfängerantennen (PCV) und Mehrwegeeffekte notwendig. Sie werden in Kapitel 6 beschrieben. Die Verwendung absoluter Antennenkalibrierungen erfüllen die Anforderungen auf den Referenzstationen und auf den bewegten Messplattformen am besten. Die vollständige Berücksichtigung der PCV bei kinematischer Nutzung gelingt aber nur, wenn die Orientierung der Antenne im dreidimensionalen Raum bekannt ist.

Ein neues Verfahren ("Hannoversches Verfahren") zur absoluten Stationskalibrierung auf Referenzstationen mit Hilfe eines Roboterarmes wird in Kapitel 6.3 vorgeschlagen und untersucht. Es kann für fest installierte Stationen verwendet werden, deren bauliche Umgebungsbedingungen sich nicht ändern. Die Funktionsweise des Verfahrens, die Modellierung der Mehrwegeeffekte und die Auswirkung der Kalibrierung auf die Messgrößen und auf die präzise relative GPS-Positionsbestimmung wird beschrieben.

Die weitgehende Berücksichtigung der Fehleranteile der GPS-Messungen mit den Verfahren, die in dieser Arbeit vorgestellt werden, erlaubt eine Genauigkeit von besser als 3 cm für die Positionsbestimmung einer bewegten Antenne. Ziel hydrographischer Messungen ist aber zumeist die Position eines weiteren Sensors wie zum Beispiel des Schwingers eines Echolotes am Rumpf eines Messschiffes oder -bootes. Die Transformation der GPS-Position auf den Schwinger (siehe Kapitel 2.4) erfordert die Kenntnis eines invarianten Raumvektors zwischen diesen Punkten in einem körperfesten System und der Lage (Orientierung) dieses Systems im übergeordneten Koordinatensystem, in dem die Positionsbestimmung der Antenne erfolgt ist (z.B. *World Geodetic System 84*, WGS84). Die Lagewinkel können sowohl mit einem GPS-Mehrantennensystem als auch mit inertialen Sensoren bestimmt werden. Die Stützung der inertialen Systeme mit GPS-Informationen wirkt sich hierbei genauigkeitssteigernd aus. Die Grundlagen, Untersuchungen zur Genauigkeit der Lagewinkelbestimmung mit INS und GPS und zur Genauigkeit der Positionslösung eines GPS-gestützten INS werden in Kapitel 7 dargelegt. Abschließend wird in diesem Kapitel konzeptionell die Kombination verschiedener Systeme in einem gemeinsamen Messsystem vorgestellt.

Die Akzeptanz eines Messsystems ist eng mit der Forderung nach einer langen Lebensdauer beziehungsweise Verfügbarkeit des Verfahrens verknüpft. In Kapitel 8 wird deshalb kurz auf die zukünftige Entwicklung globaler Navigationssysteme eingegangen. Die aktuellsten Planungen des europäischen Galileo-Systems und die neuartige Architektur der GPS III - Satelliten (Kapitel 8.3 und 8.1) lassen erkennen, dass die Systeme in Zukunft auch sicherheitsrelevanten Anwendungen gerecht werden sollen.

Kapitel 2

Anforderungen an die Positionsbestimmung für marine Anwendungen

Bei den verschiedenartigen marinen Anwendungen werden die Parameter Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Verfügbarkeit der Position unterschiedlich gewichtet. Beispielsweise werden auf hoher See für den Güter- und Personentransport wesentlich geringere Genauigkeitsanforderungen gestellt als für Gewässervermessungen im Hafenbereich. Im Bereich der maritimen Verkehrswege und der Binnenschifffahrtsstraßen in Deutschland ist das *Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen* (BMVBW) für die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs verantwortlich. Das BMVBW erstellt zur Abdeckung möglichst vieler relevanter Bedürfnisse Funknavigationspläne und gibt damit den Nutzern Planungssicherheit bezüglich der Ausstattung ihrer Fahrzeuge mit Navigationsmitteln. Vergleichbare Pläne werden unter anderem von europäischen und amerikanischen Behörden, aber auch von internationalen Organisationen erstellt.

Die vorliegende Arbeit befasst sich vertieft mit der hochpräzisen Positionsbestimmung für die Gewässervermessung. Dementsprechend wird im Folgenden auf spezielle Anforderungen für diese Anwendungen eingegangen. Es werden die für marine Anwendungen relevanten Höhensysteme und die Beschickung von Lotungsmessungen beschrieben und Anforderungen an die Bestimmung von Lagewinkeln auf mobilen Messplattformen abgeleitet.

2.1 Beschreibung der Anforderungen

Die *International Maritime Organization* (IMO), die Anforderungen und Vorschriften für die Bordausrüstung und Betriebsverfahren erstellt, und die *International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities* (IALA) entwickeln auf internationaler Ebene Systemkonzepte und technische Standards für die Funknavigation in marinen Anwendungen.

Nachfolgend werden die Anforderungen anhand der Standards der *International Hydrographic Organization* (IHO), anhand von Auszügen aus dem Deutschen Funknavigationsplan, einer Umfrage des Instituts für Erdmessung bei potentiellen Nutzern eines PDGPS-Messsystems für hydrographische Anwendungen und einiger für diese Arbeit relevanten Forschungsschwerpunkte in marinen Anwendungen erläutert.

	Sonderordnung	Ordnung 1	Ordnung 2	Ordnung 3
100% Überdeckung des Meeresbodens	erforderlich	in ausgewählten Gebieten	in ausgewählten Gebieten (ggf.)	-
horizontale Genauigkeit (2σ)				
Tiefen, Gefahren	2 m	5 m+5% von d	20 m+5% von d	150 m+5% von d
Feste Navigationshilfen	2 m	2 m	5 m	5 m
Sonstige	10 m	10 - 20 m	20 m	20 m
vertikale Genauigkeit f (2σ) (mit $f = \pm\sqrt{(a^2 + (b \cdot d)^2)}$)				
Tiefengenauigkeit nach Beschickung	$a=0.25$ m $b=0.0075$	$a=0.5$ m $b=0.013$	$a=1.0$ m $b=0.023$	$a=1.0$ m $b=0.023$
Genauigkeit des bathym. Modells	-	$a=1.0$ m $b=0.026$	$a=2.0$ m $b=0.05$	$a=5.0$ m $b=0.05$
Pegelbeobachtungen	± 0.05 m	± 0.10 m	± 0.10 m	± 0.10 cm

Tabelle 2.1: Mindeststandards der IHO. *IHO-Standards for Hydrographic Surveys, Special Publication 44* (S-44). Parameter: f : Genauigkeiten; d : Tiefe; a, b : Hilfsgrößen.

2.1.1 Die Standards der *International Hydrographic Organization* (IHO)

Die *International Hydrographic Organization* (IHO) mit ihrem *International Hydrographic Bureau* (IHB) in Monaco ist unter anderem mit der Koordination von Aktivitäten nationaler hydrographischer Behörden und der Einführung von zuverlässigen und effizienten Methoden zur Durchführung hydrographischer Vermessungen betraut. Zu diesem Zweck werden Standardisierungen entwickelt. Die Veröffentlichung der *IHO-Standards for Hydrographic Surveys* wird in der *Special Publication 44* (S-44) vorgenommen. Die im April 1998 erarbeiteten Mindeststandards werden in [Mills 1998] beschrieben. Danach werden die Einsatzgebiete in vier Seegebiete (Sonderordnung, Ordnungen 1 bis 3) gegliedert. Zur Sonderordnung gehören alle kritischen Anfahrten, zum Beispiel in Häfen. Die Ordnung 1 betrifft empfohlene Kurse, Häfen und Gebiete mit einer Wassertiefe bis 100 m, sofern sie nicht in der Sondergruppe eingegliedert sind. Ordnung 2 bezeichnet die Gebiete bis 200 m Wassertiefe, Ordnung 3 die weiteren, küstenfernen Gebiete. Die Mindeststandards sind in Tabelle 2.1 kurz zusammengefasst.

Ers ergibt sich als maximale Forderung für eine 2σ -Genauigkeit der beschickten Tiefenwerte etwa 3 dm, die bereits in der Echolotung durch systembedingte Einflüsse und durch Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Wasserschallgeschwindigkeit ausgeschöpft werden. Der Einfluss der Höhenbeschickung darf somit die Tiefengenauigkeit $\sigma_T \equiv 0.30$ m nicht deutlich belasten. Mit einer angenommenen Genauigkeit der Tiefenmessung von $\sigma_t = 0.28$ m berechnet sich die notwendige Beschickungsgenauigkeit σ_h bei unabhängigen Größen abgeleitet nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz [Pelzer 1985] mit

$$\sigma_h = \sqrt{\sigma_T^2 - \sigma_t^2} = 0.11 \text{ m.} \quad (2.1)$$

Die Höhenbeschickung ist daher für entsprechende Anwendungen mit einer Genauigkeit von besser als 1 dm vorzunehmen.

2.1.2 Der Deutsche Funknavigationsplan

Um die Sicherheit der Navigation für den See- und den Flugverkehr auf Dauer zu gewährleisten, werden von den zuständigen Behörden Navigationspläne erstellt. Aufbauend auf diesen Plänen können Entwicklungen in Forschung und Wirtschaft vorangetrieben werden. Den Nutzern, Dienstbetreibern und Herstellern von Navigationsausrüstungen wird ein Über- und Ausblick

Art der Systeme	Ortung					Kommunikation	
	Genauigkeit [m]	Integrität	TTA [sec]	Verfügbarkeit [%]	Abdeckung	Bedeutung	Art
Binnenschifffahrt							
Navigation	0.5-5	99 %	min	>99	regional	nicht erforderlich	
Flottenmanagement	1-50	100 %	<60	100	regional	erforderlich	bi
Maritime Anwendungen							
Freie See	10-100	weniger wichtig	300	99	global	optional	bi
Hafen	0.1-1	sehr wichtig	5	99.9	lokal	erforderlich	bi
Hydrographie	1-5	wichtig	30	99	lokal regional	optional	bi
Off-Shore auch: Forschung	0.1-10	sehr wichtig	10	99.9	global	erforderlich	bi
Entwicklung	0.1-3	sehr wichtig	30	99	global	optional	bi
Automat. Bahnregelung	1-3	extrem wichtig	5	99.9	regional	nicht erforderlich	
ECDIS	3-10	extrem wichtig	5	99.9	global	erforderlich	uni bi
Vermessungswesen							
Gewässer- vermessung	2D: 1-5 1D: <0.1	99.9		99.9	global	erforderlich	bi

Tabelle 2.2: Auszüge aus den Nutzeranforderungen des Deutschen Funknavigationsplanes [DFNP 1999]. Abkürzungen: TTA:Time To Alarm; bi: bidirektional; uni: unidirektional; ECDIS: *Electronical Chart Display*.

zum Fortbestand und Ausbau der Systeme über einen Zeitraum von mehreren Jahren gegeben. Die Anforderungen an die permanente Verfügbarkeit der Positionsbestimmung mit hoher Zuverlässigkeit können derzeit nur durch Funknavigationsverfahren erfüllt werden.

Die Vorgaben für die nutzbaren Frequenzen in Kommunikation und Navigation legt die *World Radio Conference* (WRC) fest. Hier werden die Frequenzbänder an die Betreiber von Funksystemen verteilt, so dass sich die Systeme untereinander nicht stören und somit den Betreibern und Herstellern von Navigationssystemen Planungssicherheit gegeben werden kann. In der Bundesrepublik Deutschland wird die Frequenzvergabe von der *Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post* (RegTP) im Sinne der Regelungen des *Internationalen Fernmeldevertrages* (IFV) der *International Telecommunication Union* (ITU) durchgeführt.

Die Planungen auf nationaler Ebene werden in Deutschland im Auftrag des *Bundesministeriums für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen* (BMVBW) durchgeführt. Der erste Deutsche Funknavigationsplan (DFNP) wurde 1996 veröffentlicht. Die USA erstellen regelmäßig den *Federal Radio Navigation Plan* (FRNP), auf europäischer Ebene wird der *European Radio Navigation Plan* (ERNP) fortgeschrieben. Der [DFNP 1999] ist als Forschungsauftrag von verschiedenen Institutionen erstellt worden und seit Dezember 1999 öffentlich zugänglich. Der DFNP behandelt unter anderem Aspekte des Landverkehrs, der Luft- und der Seeschifffahrt, des intermodalen Verkehrs und des Vermessungswesens. Für die Anwendungen wird eine Bestandsaufnahme vorgenommen, die zur Definition von Nutzeranforderungen führt. In Tabelle 2.2 sind einige für die maritimen Anwendungen und für die Binnenschifffahrt relevanten Anforderungen zusammengestellt.

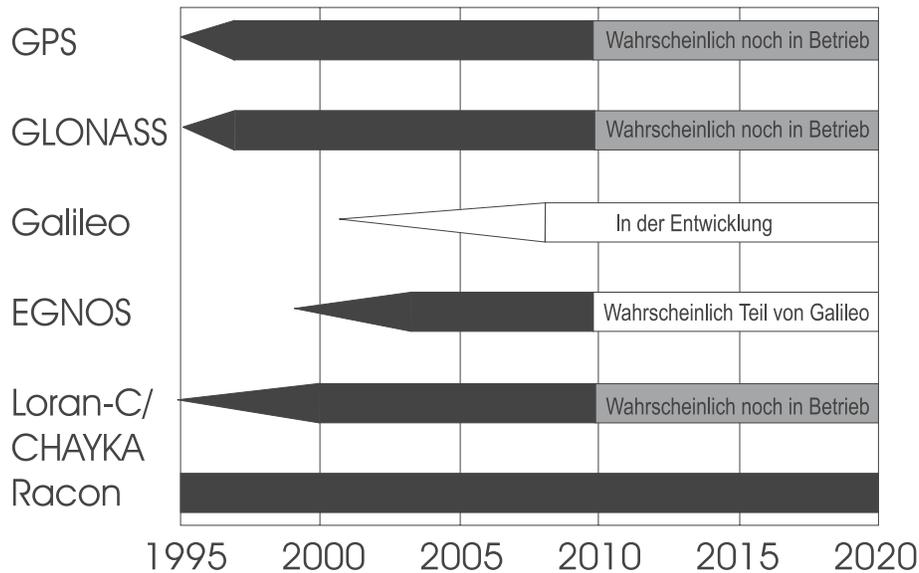


Abbildung 2.1: Zeitliche Systemplanungen für ausgewählte Funknavigationssysteme. Auszug aus dem [DFNP 1999].

Die Positionsbestimmung auf Gewässern wird im [DFNP 1999] in drei Bereichen mit behandelt. Anwendungen bezüglich der Binnenschifffahrt werden zum Landverkehr gezählt, weiterhin werden maritime Anwendungen genannt. Die Gewässervermessung wird dem Vermessungswesen zugeordnet. Hochpräzise Positionsbestimmungen mit Standardabweichungen besser als 0.1 m sind demnach bei Anwendungen im Hafen, in küstenfernen Gebieten (engl.: *off shore*), in Forschung und Entwicklung und in der Gewässervermessung mit hoher Integrität notwendig. Die Zeitspanne, in der ein Nutzer über Fehlfunktionen der Systemkomponenten oder starke Positionsungenauigkeiten durch externe Einflüsse informiert werden möchte (*time-to-alarm*), darf beispielsweise in lokalen Hafenanwendungen nur 5 s betragen.

Eine Übersicht über die zeitlichen Systemplanungen gibt die Abbildung 2.1. Es gilt als sicher, dass das GPS über das Jahr 2010 hinaus weiter betrieben wird. Die neuesten Planungen zur Zukunft des Systems sind im Kapitel 8.1 beschrieben. Dem russischen Satellitennavigationssystem GLONASS wird im DFNP eine sichere Zukunft zugeschrieben. Jedoch hat sich der Systemausbau in den Jahren 1998 bis 2002 massiv verschlechtert. Eine Weiterführung unter dem Aspekt der Zusammenarbeit mit dem europäischen EGNOS-System ist denkbar. Die Entwicklung des europäischen Systems Galileo ist vielversprechend, das Konzept wird in Kapitel 8.3 beschrieben. Das terrestrische Navigationssystem Loran-C, das im 2. Weltkrieg entwickelt wurde, erlebt zurzeit in Kombination mit dem russischem CHAYKA und GPS eine Renaissance, die im Eurofix-System (siehe Kapitel 8.4) umgesetzt wird. Unter der Abkürzung RACON werden die Radarantwortbaken (engl.: *RADAR Transponder Beacons*) zusammengefasst.

Die Fortschreibung des Planes soll voraussichtlich alle zwei Jahre durchgeführt werden. Sie ergibt sich aus der Veröffentlichung des Planes bei Herstellern, Dienstleistern und Nutzern. Aus den daraus entstehenden Diskussionen werden Anregungen und neue Anforderungen aufgenommen, mit internationalen Gegebenheiten und Ansprüchen harmonisiert und mit dem Ist-Zustand der Systeme und den neuesten Erkenntnissen aus Forschung und Entwicklung zu einem sogenannten "geplanten System-Mix" zusammengeführt. Zusammen mit den gegebenen Systemeinsatzplänen wird daraus ein neuer Funknavigationssystem entwickelt.

	2D-Position	Höhe
Beschickung von Sensordaten, Vermessungen		
Verwaltung	1-10 m	0.03-0.3 m
Privat	0.05-1 m	0.05-0.1 m
Zukünftig		
Verwaltung	0.5-1 m	0.03-0.1 m
Privat	0.03-0.2 m	0.05-0.1 m
Navigation		
Verwaltung	1-5 m	-
Privat	0.2-1 m	-

Tabelle 2.3: Genauigkeitsanforderungen an ein Positionsbestimmungssystem für hydrographische Anwendungen. Nutzerumfrage des Instituts für Erdmessung.

2.1.3 Nutzerumfrage bezüglich der Anforderungen an hydrographische Positionsbestimmungen

1996 hat das Institut für Erdmessung einen Fragenkatalog an behördliche und private Institutionen in Deutschland versendet, um Aufgaben, Ausstattung, Anforderungen und Nutzerwünsche an ein zu erstellendes Positionsmesssystem für die Hydrographie zu erfassen. Der Fragebogen wurde von insgesamt elf Institutionen beantwortet, die wesentliche Anteile an der Gewässervermessung in Deutschland haben. Folgende Aussagen können zusammenfassend abgeleitet werden:

- Als Höhenbezugsfläche, auf die sich die Messungen beziehen sollen, wird von allen Anwendern das Normalnull angegeben. Weitere verwendete Höhenbezugsflächen sind das Seekartennull (SKN) und das Helgoländer Null (HN). Nähere Erläuterungen hierzu in Kapitel 2.2.
- Gebräuchliche Punktabstände bei der Aufnahme sind bei Hafenanwendungen 1 m bis 10 m, in sonstigen Anwendungen 10 m bis 50 m. Eine höhere Punktdichte wurde von einem Teil der Befragten als sinnvoll angesehen.
- Zuverlässige, qualitätsgesicherte Messwerte auch in küstenfernen Gebieten.
- Fünf Institutionen fordern, dass das eingesetzte Positionierungssystem in Echtzeit arbeitet. Weitere fünf Befragte finden diese Eigenschaft wünschenswert.
- Möglichkeit der nachträglichen Datenverarbeitung.
- Offene Schnittstellen und Datenstandards.
- Einfache Bedienung, Mobilität, Robustheit.
- Verringerung der derzeitigen Kosten.

Die geforderten Positionsgenauigkeiten werden in der Tabelle 2.3 zusammengefasst. Für die Navigation ist im Extremfall eine Genauigkeit von 0.2 m gefordert, für die Position zum Zwecke der Beschickung und der Vermessung bis zu 0.03 m.

2.1.4 Aktuelle marine Forschungsschwerpunkte

Die Mehrzahl ozeanographischer Anwendungen befasst sich mit den Lebensformen und physikalischen sowie chemischen Zuständen in Wasserkörpern der Meere. Für die Georeferenzierung der Ergebnisse reichen zumeist einfache GPS-Verfahren zur Positionsbestimmung aus. Hinsichtlich der Bestimmung der Morphologie, der Analyse von Hebungs- und Senkungserscheinungen und Wasserstandsbeobachtungen an Pegeln an der Küste und auf dem Meer nehmen jedoch Anwendungen mit hochpräziser GNSS-Positionsbestimmung zu, insbesondere in wissenschaftlichen Anwendungen. Im Folgenden werden hierzu Beispiele genannt.

Laserscanning im Küstenbereich

Zur Überwachung von Massenbewegungen im Küsten- und besonders im Wattbereich bietet sich das Laserscanning an. An Bord eines Flugzeugs wird ein Laseraltimeter geflogen, das kontinuierlich die Höhe des Flugzeugs über Grund misst. Zur Georeferenzierung der Messungen wird die Position des Flugzeugs üblicherweise mit einem GPS/INS-System bestimmt. Vorteile gegenüber terrestrischen Verfahren und schiffgestützten Lotungen sind die Schnelligkeit und Genauigkeit des Verfahrens. Die Aufgabenstellung der Referenzierung der Laserscanner-Daten ähneln den Konzepten zur Beschickung von Lotungsmessungen, die in dieser Arbeit behandelt werden.

Kalibrierung von Altimetermessungen mittels GPS

Satelliten-Altimetermessungen dienen hauptsächlich zur

- Bestimmung des Geoids im Meeresbereich und
- Bestimmung der Meeresoberflächentopographie (*sea surface topography*, SST).

Die Positionsbestimmung mit GPS wird sowohl zur Bestimmung der Bahn des Altimetersatelliten als auch zur Kalibrierung der Messungen auf der Meeresoberfläche verwendet. Zeitgleich mit den Altimetermessungen können an ausgewählten Punkten Bojen ausgebracht werden, die mit GPS-Systemen bestückt sind und deren Messergebnisse auf die Meeresoberfläche reduziert werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, einen Druckpegel auf dem Meeresboden auszubringen, der kontinuierlich über die Auflast-Veränderung die Meeresoberflächenhöhe bestimmt. Die Einmessung und Kalibrierung des Druckpegels kann über spezielle Vorrichtungen an der Wasseroberfläche mit GPS erfolgen.

SEAL-Sea Level Change: Beobachtung der Meeresspiegeländerungen

Das SEAL-Projekt dient der Quantifizierung von Meeresspiegeländerungen. Die Beobachtungen weltweit heterogen verteilter Pegel sollen ebenso verknüpft werden wie die Messungen verschiedener Missionen satellitengetragener Altimeter (z.B. GEOS-3, SEASAT, GEOSAT, ERS, TOPEX/POSEIDON). Aktuelle Altimeter- (ENVISAT, JASON) und Schwerefeld-Missionen (CHAMP und GRACE) sollen eingebunden werden. Das Ziel ist die Bestimmung weltweiter Meeresspiegelhöhen in der Vergangenheit und Gegenwart, um die Pegelstände in die Zukunft präzisieren zu können. Es werden vier verschiedene Teilprojekte bearbeitet:

- Beobachtung des Meeresspiegels
- Eismassentransfer
- Postglaziale Ausgleichungsprozesse
- Ozeanmodellierung und Assimilation von Daten.

Die satellitengestützte Positionsbestimmung in statischen und kinematischen Anwendungen wird vor allem in den ersten drei genannten Teilprojekten eingesetzt. Die Verfahren ähneln im Grundsatz den in dieser Arbeit beschriebenen Konzepten. Als Genauigkeitsanforderungen werden diskutiert:

- Gezeitenpegel: vertikale Positionsgenauigkeit im Millimeterbereich
- Schwimmpegel: vertikale Positionsgenauigkeit im Zentimeterbereich.

Das Projekt SEAL begann Ende 2000 und wird voraussichtlich bis 2003 andauern. Projektteilnehmer sind Mitglieder der Helmholtz-Gesellschaft, das GeoForschungsZentrum in Potsdam (GFZ), das Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven (AWI) und das GKSS-Forschungszentrum in Geesthacht.

2.2 Höhenbezugssysteme

Die Höhenzuordnung spielt in hydrographischen Anwendungen eine besondere Rolle. Es kommen folgende Höhenbezugsflächen zur Anwendung:

- das Normalhöhennull (NHN, Bezugsfläche Quasigeoid),
- das Seekartennull (SKN, Bezugsfläche Mittleres Springtiden-Niedrigwasser MSpNW),
- das Pegelnull (PN, Bezugsfläche Quasigeoid) und
- ellipsoidische Bezugssysteme (z.B. WGS84, ITRS, ETRS 89).

Die Abbildung 2.2 verdeutlicht die verschiedenen Systeme.

Als Bezug für Gebrauchshöhen bietet sich das Geoid als eine Geopotentialfläche des Erdschwerefeldes an, die näherungsweise mit dem mittleren Wasserspiegel (MWS) zusammenfällt. Die Differenz zwischen dem Potential des Geoids W_0 und eines Punktes P (W_P) wird als geopotentielle Kote $C = W_0 - W_P$ bezeichnet. Die Ableitung eines metrischen Maßes gelingt durch die Bestimmung des Abstandes des Punktes P vom Geoid längs der gekrümmten Lotlinie, der orthometrischen Höhe H^O . Zur Berechnung von H^O wird der Schwereverlauf entlang der Lotlinie im Erdinnern benötigt. Dieser ist in der Regel nicht verfügbar, so dass zur Definition der Höhensysteme Festlegungen getroffen werden müssen. In Deutschland sollen zukünftig alle Höhen in Normalhöhen des Deutschen Haupthöhen Netzes DHHN92 geführt werden. Der Schwereverlauf wird aus dem Rotationsellipsoid GRS80 abgeleitet. Der Abtrag der Normalhöhen H^N nach unten ergibt das Quasigeoid oder Normalhöhennull (NHN) als Höhenbezugsfläche. Im norddeutschen Küstenbereich weichen diese von der Äquipotentialfläche des Geoids nur um wenige Zentimeter ab. Das NHN wird im Binnenbereich, an der Ostsee und in küstennahen Gebieten als Referenzfläche für Gewässervermessungen verwendet.

Die Tiefenangaben einer Seekarte beziehen sich üblicherweise auf ein lokales Seekartennull (SKN). Das Kartennull wird so tief festgelegt, dass der tatsächliche Wasserstand nur selten darunter fällt. Die Angaben erleichtern die Berechnung der Befahrbarkeit der Schifffahrtswege ohne genaue Kenntnis der Tidenverhältnisse. In nahezu gezeitenfreien Gewässern wie dem deutschen Teil der Ostsee wird das NHN als Kartennull verwendet. In der Deutschen Bucht fällt der Wasserstand aufgrund der Meeresgezeiten regelmäßig unterhalb des NHN, so dass zur Festlegung des Seekartennull das lokale Mittlere Springtiden-Niedrigwasser (MSpNW) gewählt wird. Das

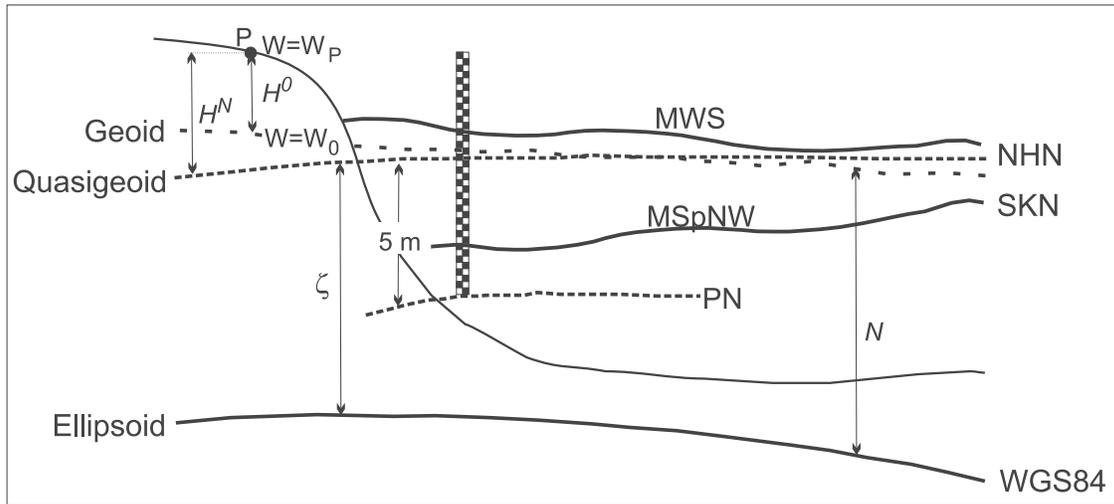


Abbildung 2.2: Höhenbezugssysteme an Deutschen Küsten.

MSpNW wird üblicherweise jährlich von der *Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrographie* (BSH) in Hamburg aus den Daten von Dauerpegeln berechnet. Jährlich können Änderungen von wenigen Zentimetern auftreten.

Für Wasserstandsbeobachtungen an Betriebspegeln wird das Pegelnul (PN) verwendet. Das Pegelnul ist einheitlich auf 5 m unter NHN festgelegt, um negative Wasserstände zu vermeiden.

Die Positionen satellitengestützter Messverfahren sind zunächst auf das entsprechende Referenzellipsoid des Systems bezogen (z.B. GPS: *World Geodetic System* WGS84). Bei differentiellen Verfahren werden die Messergebnisse entsprechend auf die Lagerungen der Referenzstationen bezogen. Das *European Terrestrial Reference Frame* 1989 (ETRF 89) als europäische Realisierung des *International Terrestrial Reference System* (ITRS), wurde laut AdV-Beschluss im Mai 1995 als Referenzsystem in Deutschland eingeführt. Die Höhen über dem Ellipsoid werden mit h bezeichnet.

Verknüpfung zwischen ellipsoidischer und normalorthometrischer Höhe

Zwischen ellipsoidischer Höhe h und normalorthometrischer Höhe H^N besteht mit der Geoidundulation ζ die fundamentale Beziehung [Torge 2001]:

$$h = H^N + \zeta. \quad (2.2)$$

Die Bereitstellung von Geoidmodellen zur Berechnung der Undulationen erlaubt die Transformation der mit GPS beschickten ellipsoidischen Lotungsmessungen auf das NHN. Für Deutschland bietet sich hierzu beispielsweise das *European Gravimetric Quasigeoid* EGG97 an, das eine Genauigkeit von 1 cm bis 5 cm auf Entfernungen von 10 km bis einigen 100 km in Europa erreicht [Denker und Torge 1998].

Verknüpfung zwischen ellipsoidischer Höhe und Seekartennul

Der Bezug zwischen SKN und ellipsoidischen Höhensystemen kann über GPS-Messungen auf Pegelpunkten hergestellt werden. Die SKN-Fläche zwischen den Pegelstützpunkten kann über polynomiale Modellierungen bestimmt werden. Eine Beschreibung des Verfahrens und seiner Ergebnisse können [Goffinet 2000] entnommen werden.

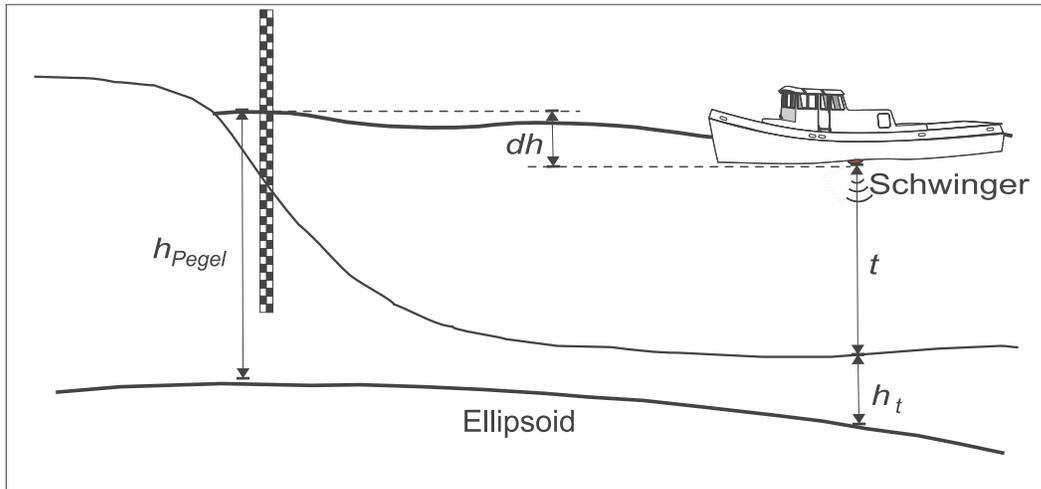


Abbildung 2.3: Prinzipskizze zur indirekten Beschickung über Pegelmessungen.

2.3 Beschickung von Lotungsmessungen

Der Begriff Beschickung beschreibt die Zuordnung der Tiefenwerte zu einem Höhen Bezugssystem. Dabei werden grundsätzlich zwei Vorgehensweisen getrennt:

- die direkte oder geometrische Höhenübertragung auf das Messschiff,
- die indirekte Höhenübertragung über den Wasserspiegel.

Bei der direkten Höhenübertragung wird das Schiff von Land aus durch ein begleitendes Nivellement oder durch trigonometrische Höhenbestimmung beobachtet. Die Genauigkeit und Reichweite ist durch Refraktionseinwirkungen in den optischen Messverfahren stark eingeschränkt. Die vorliegende Arbeit führt relative GPS-Messungen als direktes Verfahren ein.

Das Verfahren der indirekten Höhenübertragung (siehe Abbildung 2.3) basiert auf der Annahme, dass sich der Wasserspiegel an einem Pegel gleich dem Wasserspiegel an der Messplattform verhält oder um bestimmbare Korrekturen abweicht. Dabei sind die Pegel fest oder temporär für die Vermessungen installiert. Zugleich muss die Höhendifferenz des Pegelnullpunkts zum Bezugssystem bekannt sein. Der Stand des Wasserspiegels zum Bezugshorizont h_{Pegel} wird sich aus der Summe der Höhendifferenz des Pegelnullpunkts zum Bezugssystem und dem abgelesenen Pegelwert bestimmt. Im Küstenbereich wird die Beschickung vor allem durch die Gezeiten beeinflusst. Der Einfluss der Gezeiten kann als fortschreitende Tidewelle mit unterschiedlichen Amplituden betrachtet werden. Die Linien gleichzeitiger Hochwassereintritte und gleichen Springtidenhubs werden in Wasserstands-Errechnungskarten (WEK) des BSH jeweils bezogen auf einen Pegel dargestellt. Die Pegelablesung unterscheidet sich von dem Wasserspiegel auf der Messplattform um die Differenz der Einflussgrößen Gezeiten, *sea surface topography* SST, Wellengang und schiffsdynamische Effekte. Die Parameter werden von Wind, Strömungen und Zusammensetzung des Wassers, aber auch von Geschwindigkeit und Beschleunigung der Messplattform in schwer erfassbarer Weise beeinflusst, so dass eine Modellierung nur unzureichend gelingen kann und deshalb zumeist unterlassen wird.

Die vom Wellengang hervorgerufenen Auf- und Abwärtsbewegungen (Hub, engl.: *heave*, siehe Tabelle 2.4) können an Bord der Messplattform mit einem Hubkompensator gemessen werden.

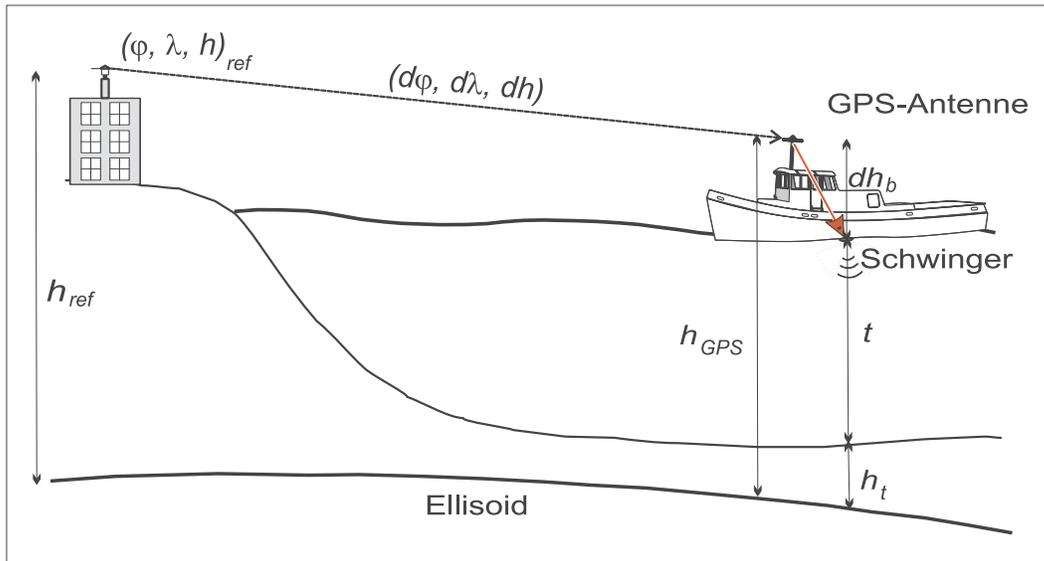


Abbildung 2.4: Prinzipskizze zur direkten Beschickung mit GPS-Verfahren.

Achse	Rotation	positiv, wenn	Translation	positiv nach
x	Rollen/roll	steuerbord unterhalb backbord	Schnellen/surge	vorwärts
y	Stampfen/pitch	Bug höher als Heck	Versetzen/sway	steuerbord
z	Gieren/yaw Kurs	Bug nach steuerbord Bug nach steuerbord	Tauchen/heave	abwärts

Tabelle 2.4: Komponenten der Schiffsbewegungen. Steuerbord: in Fahrtrichtung rechts, backbord: in Fahrtrichtung links, Bug: vorderer Schiffsrumpf, Heck: hinterer Schiffsrumpf.

Als solche werden üblicherweise Beschleunigungsmesser in inertialen Messeinheiten verwendet. Langperiodische Wellen (z.B. Gezeiten) können auf diese Weise aufgrund auftretender Driften der inertialen Sensoren nicht bestimmt werden. Zusätzlich hebt und senkt sich die Messplattform um den Saugwert (engl.: *squat*) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs, der Wassertiefe und der Zusammensetzung des Wassers. Die langperiodischen Anteile des Squat-Effektes lassen sich ebenfalls nicht von ungestützten inertialen Hubsensoren bestimmen und nur schwer modellieren. Die Einsaugtiefe des Squat kann mehrere Dezimeter betragen.

Die differentiellen Positionsbestimmungsverfahren des GPS sind als direkte Verfahren einzuordnen. Die dreidimensionale Position einer Antenne an Bord des Messschiffes wird bezüglich einer Referenzstation an Land bestimmt, deren Koordinaten $(\varphi_{ref}, \lambda_{ref}, h_{ref})$ in einem definierten Bezugssystem bestimmt sind (siehe Abbildung 2.4). Die Koordinatendifferenzen $(d\varphi, d\lambda, dh)$ beziehen sich auf das Referenzellipsoid des WGS84. Für die Beschickung von Lotungsmessungen muss die Antennenposition auf den Schwinger des Echolotes reduziert werden. Für hohe Genauigkeiten ist dafür die Berücksichtigung der Schiffslagewinkel (Rollen, Stampfen und Kurs) notwendig, siehe Kapitel 2.4. Zusätzliche Informationen über Hub und Squat sind nicht notwendig.

Die Genauigkeiten der indirekten Beschickung über Pegelmessungen und der direkten Beschickung mit GPS wurden u.a. in [Heimberg 1994] anhand eines Vergleiches von Pegelraten und Ergebnissen einer Peilfahrt auf einem Vermessungsboot vor Norderney mit besser als 10 cm für kurze Entfernungen zwischen Vermessungsboot und Pegel abgeschätzt.

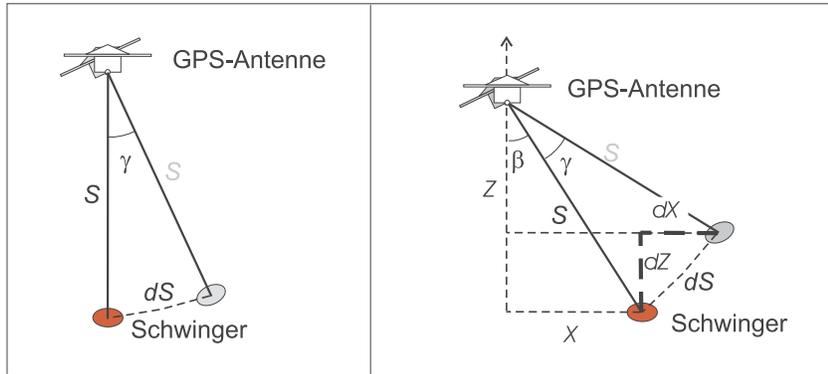


Abbildung 2.5: Reduzierung einer GPS-Position auf einen hydrographischen Sensor.

2.4 Anforderungen an die Lagewinkelgenauigkeit für die Beschickung von Lotungsmessungen

Bei der direkten Beschickung wird die Position eines Sensors an Bord bestimmt, zum Beispiel einer GPS-Antenne. Die Lotungsmessungen werden zumeist mit einem Schwinger am Schiffsrumpf durchgeführt. Für die Beschickung der Lotungsmessungen auf ein ellipsoidisches Bezugssystem (z.B. des WGS-84) wird die Position der GPS-Antenne \vec{A} im WGS-84 über den Ablagevektor \vec{D}_S^A im Schiffskordinatensystem und die Schiffs-lagewinkel (Kurs α , Rollen Ψ und Stampfen Θ) mit Hilfe der Rotationsmatrix $R(\alpha, \Theta, \Psi)$ auf den Schwinger \vec{S} im WGS-84 transformiert. Die Lagewinkel beschreiben die Rotationen, um die das Schiffskordinatensystem in das lokal geodätische Bezugssystem gedreht werden muss. Die Beschreibung der Rotationsmatrix ist unter anderem in [Heimberg 1994] nachgewiesen. Eine Übersicht über die Komponenten der Schiffsbewegung gibt die Tabelle 2.4. Der Kurswinkel wird zumeist relativ zu einer Nordrichtung angegeben. Das Gieren bezeichnet die Abweichung der X-Achse des Fahrzeugs vom gefahrenen Kurswinkel, beispielsweise hervorgerufen durch Strömungen und Winddruck. Die Transformationsgleichung lautet:

$$\vec{S} = \vec{A} + R(\alpha, \Theta, \Psi) \cdot \vec{D}_S^A. \quad (2.3)$$

Für eine Abschätzung der erforderlichen Genauigkeit der Lagewinkelbestimmung kann vereinfachend angenommen werden, dass sich ein kleiner Winkel γ über die Strecke S als Abweichung dS auswirkt. Für den Fall, dass die Antenne vertikal über den Schwinger montiert ist, wirkt sich die Neigung γ nahezu nur in der Horizontalen aus, kaum jedoch in der Höhe. In hydrographischen Anwendungen mit der Höhe als vornehmlicher Zielgröße bietet sich eine derartige Montierung an. Die Abweichung dS teilt sich in die Höhenablage dZ und die horizontale Ablage dX auf, die von den Einmessungsgrößen X und Z und der Schiffsneigung γ abhängig sind. Die Formeln 2.4 und 2.5, abgeleitet aus einfachen geometrischen Betrachtungen in der Abbildung 2.5, verdeutlichen die Zusammenhänge.

$$dX = X - \sin(\beta + \gamma) \cdot S \quad (2.4)$$

$$dZ = Z - \cos(\beta + \gamma) \cdot S \quad (2.5)$$

mit $\sin\beta = \frac{X}{S}$.

Die Tabelle 2.5 zeigt Abschätzungen für die notwendige Genauigkeit einer Lagewinkelmessung in Abhängigkeit von der Geometrie der Einmessungen an Bord, die als fehlerfrei angenommen werden sollen. Die meisten Anforderungen sind von Lagemesssystemen mit Genauigkeiten von 0.1° erreichbar.

Einmessung		Horizontale (dX) und vertikale (dZ) Abweichungen									
		$\gamma=0.05^\circ$		$\gamma=0.1^\circ$		$\gamma=0.5^\circ$		$\gamma=1^\circ$		$\gamma=5^\circ$	
X	Z	dX	dZ	dX	dZ	dX	dZ	dX	dZ	dX	dZ
0.0	2.0	0.002	0.000	0.003	0.000	0.017	0.000	0.035	0.000	0.175	0.008
0.0	5.0	0.004	0.000	0.009	0.000	0.044	0.000	0.087	0.001	0.436	0.019
0.0	15.0	0.013	0.000	0.026	0.000	0.131	0.001	0.262	0.002	1.307	0.057
2.0	5.0	0.004	0.002	0.009	0.003	0.044	0.018	0.087	0.036	0.428	0.193
5.0	15.0	0.013	0.004	0.026	0.009	0.131	0.044	0.261	0.090	1.288	0.493
10.0	15.0	0.013	0.009	0.026	0.017	0.131	0.088	0.260	0.177	1.269	0.929

Tabelle 2.5: Horizontale (dX) und vertikale (dZ) Abweichungen bei der Transformation von GPS-Antenne auf einen Zielsensor in Abhängigkeit von der Sensorpositionen an Bord (X, Z) und der Größe der Lagewinkelabweichung γ . Angaben in [m].

2.5 Fazit

Ein zuverlässiges, global einsetzbares Messsystem, das in Echtzeit -mit einem Datenalter von wenigen Sekunden- Positionen mit einer Genauigkeit von 0.03 m (3D-Genauigkeit) und besser liefert, erfüllt alle gängigen Anforderungen der Positionsbestimmung in der Gewässervermessung. Für die Höhenbestimmung fest installierter Pegel sind Millimetergenauigkeiten gefordert. Dies gilt auch bei kontinuierlichen Bauwerksüberwachungen wie zum Beispiel Sperrwerken an der Küste, bei denen Senkungen durch Meerestideneinflüsse von mehreren Millimetern beobachtet werden können [Andrée et al. 2000].

Für die Transformation der GPS-Beobachtungen auf einen zu beschickenden Zielsensor (z.B. Schwinger) werden Lagewinkel der Schiffsbewegung hinzugezogen. Die notwendige Genauigkeit des Lagesensors ist abhängig von der Geometrie des Aufbaus an Bord (Differenzvektor zwischen Antenne und Zielsensor) und von den Genauigkeitsanforderungen an die horizontalen und vertikalen Komponenten an Bord. In erster Näherung kann festgestellt werden, dass für die Datentransformation bei Vermessungsschiffen eine Genauigkeit der Lagewinkel von 0.1° ausreichend ist. Für kleinere Vermessungsboote ist eine Genauigkeit von etwa 5° gefordert.

Im Rahmen dieser Arbeit wird gezeigt, wie derartige Anforderungen effektiv in Echtzeit von dem GPS, eventuell in Verbindung mit weiterer Sensorik, erfüllt werden können. Die Genauigkeit einer gegebenenfalls notwendigen Transformation der GPS-Positionen aus dem WGS84 in ein anderes Bezugssystem ist abhängig von der Genauigkeit der Transformationsparameter und wird hier nicht behandelt.

Kapitel 3

Präzise Positionsbestimmung mit GPS

Die präzise Positionsbestimmung mit dem NAVSTAR GPS (*NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System*, GPS) hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die Ursache hierfür ist die Überlegenheit des GPS gegenüber anderen Messverfahren insbesondere aufgrund der folgenden Eigenschaften:

- universelle und wirtschaftliche Einsatzmöglichkeiten,
- hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit,
- fallende Preise und Miniaturisierung der Geräteausstattung,
- einfache Bedienung,
- leistungsfähige und nutzerfreundliche Auswerteprogramme und
- Echtzeitfähigkeit.

Die Beobachtungen zu den GPS-Satelliten werden durch unterschiedliche Einflüsse (siehe Kapitel 3.2) beeinträchtigt. Um präzise Positionsbestimmungen mit GPS vornehmen zu können, werden die Fehlereinflüsse modelliert und durch differentielle Verfahren reduziert.

Zur Modellierung werden Messungen auf Referenzstationen herangezogen, deren Koordinaten bekannt sind. GPS-Referenzstationsbetreiber (siehe Kapitel 3.3) bieten ihre Dienste dem Nutzer an, der sich mit Hilfe differentieller GPS-Verfahren mit einer Genauigkeit von wenigen Metern bis hin zu einem Millimeter, weltweit oder lokal, in Echtzeit oder durch nachträgliche Auswertung (engl.: *postprocessing*) positionieren möchte. Damit sind nahezu alle Anforderungen an navigatorische und geodätische Anwendungen abgedeckt.

Die Auswertesoftware für Echtzeitanwendungen, die zur Erfüllung dieser Aufgaben im Rahmen dieser Arbeit genutzt wurde, wird im Abschnitt 3.4 beschrieben.

3.1 Grundlagen zur Positionsbestimmung mit GPS

Die Entwicklung des GPS wurde 1973 durch das US-Verteidigungsministerium (*Department of Defense*, DoD) eingeleitet, um den Navigationsanforderungen der amerikanischen Streitkräfte und ihrer Verbündeten nachzukommen. Die vollständige Operationalität (*full operational capability*, FOC) des Systems wurde 1995 erklärt. Somit stehen global jederzeit mindestens vier

Satelliten gleichzeitig über dem freien Horizont zur Positions- und Zeitbestimmung zur Verfügung.

Alle Signale eines Satelliten werden aus einem hochpräzisen Oszillator an Bord mit der Grundfrequenz $f=10.23$ MHz abgeleitet. Durch Multiplikation entstehen die zwei Trägerfrequenzen

- L1: $154 \cdot 10.23 \text{ MHz} = 1575.42$ MHz ($\Rightarrow \lambda = 0.1905$ m),
- L2: $120 \cdot 10.23 \text{ MHz} = 1227.60$ MHz ($\Rightarrow \lambda = 0.2445$ m)

und die zwei Codesequenzen

- auf L1 und L2: P-Code mit 10.23 MHz ($\Rightarrow \lambda = 29.31$ m) und
- auf L1: C/A-Code mit 102.3 MHz ($\Rightarrow \lambda = 293.1$ m).

Zusätzlich wird ein Datensignal mit 50 *bits-per-second* (bps) auf die Träger moduliert. Mit diesem Datenstrom werden unter anderem die Ephemeriden an den Nutzer gesendet. Die Satellitenuhren realisieren eine einheitliche Zeitbasis für alle Messungen (GPS-Systemzeit). Die Ephemeriden aller Satelliten und damit in erster Näherung auch die abgeleiteten Koordinaten beziehen sich auf das *World Geodetic System 1984* (WGS84). Die Nutzung des L2-Signals, des P-Codes und die Genauigkeit der Ephemeriden und Messsignale können durch die Systemsicherungstechniken *Selective Availability* (SA) und *Anti-Spoofing* (A-S) für die zivilen Nutzer des *Standard Positioning Service* (SPS) eingeschränkt werden. Die zumeist militärischen Nutzer des *Precise Positioning Service* (PPS) sind in der Lage, die genannten künstlichen Verschlechterungen zu korrigieren und damit höhere Genauigkeiten zu erreichen. SA wurde am 01. Mai 2000 auf Dauer abgestellt [Clinton 2000].

Für eine Einzelstationslösung sind die Beobachtungen von mindestens vier Satelliten mit einem GPS-Empfänger erforderlich. Aus den Messungen werden die Laufzeiten der Signale und damit die Strecken zwischen Satelliten und Empfänger und die Differenzen zur GPS-Systemzeit ermittelt. Mit Codemessungen lassen sich so Positionen einzelner Empfänger mit Genauigkeiten von wenigen Metern erreichen.

Gegenstand dieser Arbeit sind die hochpräzisen Positionsbestimmungen mit Genauigkeiten im Zentimeterbereich. Insbesondere in kinematischen und schnellen statischen Anwendungen ist hierzu die Lösung der Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten mit schnellen Algorithmen notwendig. Diese Algorithmen werden üblicherweise mit *On-The-Fly* (OTF) beziehungsweise mit *On-The-Way* (OTW) bezeichnet. Die hochpräzise Positionsbestimmung mit Trägerphasen setzt die weitgehende Modellierung oder Eliminierung der GPS-Fehler voraus. Sind alle wirkenden Fehlereinflüsse in ihrer Größe mit genügender Genauigkeit bekannt, kann eine absolute Positionsbestimmung durchgeführt werden. Eine vollständige absolute Modellierung aller Fehlereinflüsse ist erstrebenswert, jedoch für Zentimetergenauigkeiten noch nicht möglich, so dass differentielle Verfahren angewendet werden müssen. Mit Hilfe von Messungen auf koordinatenmäßig bekannten Referenzstationen wird ein Teil der Fehler modelliert beziehungsweise durch Differenzbildung zu diesen Stationen reduziert. Üblicherweise werden in Echtzeit Streckenkorrekturen für Code- und Trägerphasenmessungen jedes Satelliten an den Nutzer transferiert, die an die jeweiligen Messungen angebracht werden (Korrekturen im Beobachtungsraum). Denkbar ist auch die Übermittlung eines Zustandsvektors zur Beschreibung des Fehlerhaushalts (Modellierungen im Zustandsraum).

3.2 GPS-Fehlerhaushalt

Die Beobachtungsgleichung für eine GPS-Phasenmessung $PR_{f,k}^j$ zwischen dem Phasenzentrum des Satelliten j und der Empfängerantenne k für die Frequenz f auf dem Signal s lautet nach [Wübbena und Willgalis 2001]:

$$PR_{f,k}^j = |R_k^j| + \delta B_{s,k}^j + \lambda_s \cdot N_{s,k}^j + \epsilon_{s,k}^j \quad (3.1)$$

mit den Bezeichnungen

j	Index für den beobachteten Satellit
k	Index für den beobachtenden Empfänger
f	Index für die Frequenz λ_s (L1, L2 für GPS bzw. GLONASS, ...)
s	Index für das Signal (L1, L2)
R_k^j	Radiusvektor zwischen den Phasenzentren der Empfangsantenne und der Satellitenantenne
$\delta B_{s,k}^j$	Bias-Term
λ_s	Wellenlänge des Signals
$N_{s,k}^j$	Mehrdeutigkeiten der Phasenmessungen
$\epsilon_{s,k}^j$	zufällige Messfehler.

Die Gleichung 3.1 ist der Übersichtlichkeit halber um den aus dem Datensignal bekannten Anteil des Satellitenuhrfehlers, um relativistische Korrekturen und um den modellierbaren Anteil der troposphärischen Verzögerung bereinigt. Der Bias-Term $\delta B_{s,k}^j$ setzt sich aus den folgenden Fehlereinflüsse zusammen:

$$\delta B_{s,k}^j = \delta C_{s,k}^j + \delta D_{s,k}^j + \delta S_{s,k}^j \quad (3.2)$$

mit

$\delta C_{s,k}^j$	Uhrenfehler (Satellit und Empfänger)
$\delta D_{s,k}^j$	entfernungsabhängige Fehleranteile
$\delta S_{s,k}^j$	stationsabhängige Fehleranteile.

Der Uhrterm $\delta C_{s,k}^j$ umfasst den verbleibenden Satellitenuhrfehler δt^j , den Empfängeruhrfehler δt_k und die signalabhängigen Verzögerungen in der Hardware des Satelliten δd_s^j und des Empfängers $\delta d_{s,k}$.

$$\delta C_{s,k}^j = \delta t_k + \delta d_{s,k} - \delta t^j - \delta d_s^j = \delta C_{s,k} - \delta C_s^j. \quad (3.3)$$

Bei vernachlässigbaren Differenzen bei den Laufzeitverzögerungen der Empfangskanäle eines Empfängers kann $\delta d_{s,k}$ als Teil eines gesamten Uhrfehlers des Empfängers $\delta C_{s,k}$ angesehen werden, was für alle gängigen geodätischen Empfängertypen angenommen werden kann [Seeber 1993]. Ebenso geht δd_s^j zusammen mit δt^j in einem gemeinsamen Satellitenuhrfehler δC_s^j auf. Einflüsse der Uhren müssen für hochpräzise Anwendungen von Epoche zu Epoche neu geschätzt bzw. durch Bildung doppelter Differenzen eliminiert werden.

Die entfernungsabhängigen Fehleranteile $\delta D_{s,k}^j$ sind auf kurzen Distanzen miteinander hoch korreliert. Die Modellierung der Einflüsse mit Hilfe der Messungen auf einer koordinatenmäßig bekannten Referenzstation ist somit auch in Entfernungen von einigen Kilometern mit ausreichender Genauigkeit gültig. Bei größeren Entfernungen zur nächsten Referenzstation bietet sich

Fehlerquelle Einfluss	Satelliten- bahnen	Satelliten- uhren	Ionosphäre	Troposphäre	Empfänger- multipath	Empfänger- Antenne
absolut	5-50 m	5-100 m	0.5-<100 m	0.01-0.5 m	mm-cm	mm-cm
relativ	0-2 ppm	0	1-<50 ppm	<3 ppm	mm-cm	mm-cm

Tabelle 3.1: Wesentliche GPS-Fehlerquellen und ihre Auswirkung auf die Strecken der Trägerphasenmessungen.

die Modellierung der Fehlereinflüsse mit Hilfe mehrerer, möglichst räumlich das Messgebiet umschließende Referenzstationen an. Dem Gedanken folgend, dass diese Stationen der Abtastung des Zustandes von Atmosphäre und Bahnfehlern dienen, können sie auch als Sensorstationen bezeichnet werden.

$$\delta D_{s,k}^j = \frac{R_k^j}{|R_k^j|} \cdot \delta \vec{\sigma}^j + \delta I_{f,k}^j + \delta T_k^j \quad (3.4)$$

mit

- $\delta \vec{\sigma}^j$ Bahnfehler des Satelliten
- $\delta I_{f,k}^j$ Ausbreitungsverzögerungen in der Ionosphäre
- δT_k^j Ausbreitungsverzögerungen in der Troposphäre.

Stationsabhängige Anteile $\delta S_{s,k}^j$ können aufgrund ihrer Entstehung (z.B. über identische Reflektoren bei Multipath) miteinander korreliert sein. Die Reduzierung der Fehlerquellen wird aber für jede Station gesondert vorgenommen.

$$\delta S_{s,k}^j = \delta A_{f,k}^j + \delta M_{f,k}^j + \delta E_{f,k}^j + \delta W_{s,k}^j \quad (3.5)$$

mit

- $\delta A_{f,k}^j$ Variationen der Antennenphasen des Empfängers (PCV)
- $\delta M_{f,k}^j$ Mehrwegeeffekte (Multipath) am Empfänger
- $\delta E_{f,k}^j$ Variationen der Antennenphasen am Satelliten
- $\delta W_{s,k}^j$ Multipath am Satelliten.

In differentiellen Verfahren zur Positionsbestimmung ist immer mindestens eine Referenzstation und eine hinsichtlich ihrer Position zu bestimmende Roverstation beteiligt. Durch Nutzung unterschiedlicher Empfängerantennen auf Referenz- und Roverstationen oder durch Drehung oder Kippung gleicher Antennen zueinander werden unterschiedliche Phasenvariationen $\delta A_{f,k}^j$ wirksam. Absolute Antennenkalibrierungen sind universell einsetzbar und reduzieren die Fehler bei Anbringung auf Millimeterniveau. Die Größe des Mehrwegeeffektes $\delta M_{f,k}^j$ verändert sich bereits bei Verschiebung einer Antenne um kleine Beträge von wenigen Zentimetern signifikant.

Die Variationen der Antennenphasen und der Multipath an den Satelliten wirken sich über lange Strecken entfernungsabhängig aus. Sie können generell jedoch für jede "Station" (Satellit) kalibriert werden, so dass sie hier zu den stationsabhängigen Anteilen gezählt werden. Zum jetzigen Zeitpunkt werden sie in der Praxis für die Positionsbestimmung nicht modelliert.

Fehlerart	Funktionales Modell	Stochastisches Modell	Korrelationslängen
δt^j	Polynom 2. O.	weißes Rauschen	0
δd_s^j	konstant	integriertes weißes Rauschen	0
δt_k	-	weißes Rauschen	0
$\delta d_{s,k}$	konstant	integriertes weißes Rauschen	0
$\delta \vec{\sigma}^j$	kartesische Parameter	3D Gauss-Markov-Prozess	200 km - 1000 km
$\delta I_{f,k}^j$	Schichtmodell mit bilinearem Polynom	3D-Gauss-Markov-Prozess	
δT_k^j	modifiziertes Hopfield Modell	2 · Maßstab/Station	1 h - wenige h
$\delta E_{f,k}^j$	-	-	-
$\delta W_{s,k}^j$	-	-	-
$\delta A_{f,k}^j$	Kalibrierung	-	-
$\delta M_{f,k}^j$	Kalibrierung	-	-
	elevationsabhängige Gewichtung	Gauss-Markov-Prozess 1. O.	-
$N_{f,k}^j$	konstant, wenn gefixt	-	-
$\epsilon_{f,k}^j$	-	weißes Rauschen	0

Tabelle 3.2: Funktionale und stochastische Beschreibung der GPS-Fehlerquellen nach [Wübbena und Willgalis 2001] und [Wübbena 1991]

Die Größenordnung der Fehler wird in Tabelle 3.1 beschrieben. Eine Zusammenfassung der Fehler, die Modellierung des funktionalen und des stochastischen Modells in der verwendeten Software GEONAP und GNRT und mögliche Korrelationslängen sind in der Tabelle 3.2 zusammengestellt.

In den Kapiteln 4 und 6 wird auf eine verfeinerte Modellierung der Fehler zur hochpräzisen Positionsbestimmung in regionalen Netzen eingegangen.

3.3 Referenzstationsdienste

Die Zuverlässigkeit der GPS-Positionsbestimmung kann empfangnerintern durch das *Receiver Autonomous Integrity Monitoring* (RAIM) verbessert werden. Die Messungen zu mehr als fünf Satelliten, die bei freiem Horizont größtenteils möglich sind, erlauben eine Aussage über die Qualität der einzelnen Beobachtungen ohne Kenntnis der genauen Position des Empfängers. Diese Aussagen können beispielsweise zur Mindergewichtung oder Verwerfung der gestörten Beobachtungen bereits im Empfänger genutzt werden.

Eine Modellierung oder Reduzierung des Fehlerhaushalts für die präzise Positionsbestimmung kann aber nur über Beobachtungen auf Referenzstationen herbeigeführt werden, die mit den Messungen auf der Nutzerstation korreliert werden. Derartige Verfahren werden mit *Differential GPS* (DGPS) bezeichnet. [Parkinson und Enge 1996] unterteilt die DGPS-Verfahren nach ihren Leistungskriterien in

- *Local Area DGPS* (LADGPS),
- *Wide Area DGPS* (WADGPS) und
- *Carrier-Phase DGPS* (CDGPS). Vielfach, insbesondere im deutschen Sprachraum, wird statt CDGPS die Bezeichnung *Precise DGPS* (PDGPS) verwendet.

Local Area DGPS- und *Wide Area DGPS*-Systeme werden zur Verbesserung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Positionsbestimmung hauptsächlich basierend auf Codephasenmessungen herangezogen. Bei dem LADGPS wird für jeden Satelliten eine Korrektur aus den Beobachtungen einer Referenzstation ermittelt. Die Korrekturen werden bis etwa maximal 1000 km für Genauigkeitsanforderungen von wenigen Metern verwendet. Nach Deaktivierung des SA verlieren die Anwendungen über große Entfernungen mit LADGPS an Bedeutung, da eine Einzelstationslösung bereits eine Genauigkeit von wenigen Metern erreicht. Für geringere Entfernungen (z.B. weniger als 100 km) können sie aber noch für Anwendungen mit Genauigkeitsanforderungen von etwa 1 m bis hin zu wenigen Dezimetern genutzt werden.

Korrekturen aus einem WADGPS bestehen aus individuellen Vektoren (Uhr- und Bahnfehler, Ionosphärenmodell) für jeden Satelliten, die aus den Beobachtungen eines zumeist kontinentalen oder globalen Referenzstationsnetzes abgeleitet werden. Im Abschnitt 3.3.4 wird das *Global Differential GPS* (GDGPS) der NASA beschrieben, mit dem weltweit eine Genauigkeit von wenigen Dezimetern in Echtzeit erreicht wird. Anstelle der Bezeichnung WADGPS wird unter anderem bei der Luftfahrtbehörde der USA (*Federal Aviation Administration* FAA) die Bezeichnung WAAS als Abkürzung für *Wide Area Augmentation System* geführt.

Die PDGPS-Dienste erschließen dem Nutzer eine Genauigkeit von wenigen Zentimetern und besser unter Bereitstellung von Trägerphasenmessungen beziehungsweise -korrekturen. Ein Beispiel ist SAPOS, der *Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessungen*, der ebenfalls im Abschnitt 3.3.4 kurz beschrieben wird.

3.3.1 Datenformate und -übertragung für Anwendungen im Postprocessing

Für Anwendungen im Postprocessing und *near-online* können die Daten im *Receiver Independent Exchange* (RINEX) -Format vom Referenzstationsbetreiber angefordert werden, das alle Hersteller geodätischer Empfänger unterstützen. RINEX wurde entwickelt, um über einen internationalen Standard mit unterschiedlichen Softwarepaketen oder in gemischten Netzen auszuwerten.

Jeder Hersteller von GPS-Empfängern verwendet ein eigenes Datenformat für die GPS Beobachtungen, das er im Empfänger abspeichert oder über eine Schnittstelle auf einen Rechner ausgibt. Empfängereigene Datenformate lassen sich meist nur durch herstellereigene Software auswerten.

In [Gurtner et al. 1989] wurde das RINEX erstmals als Grundlage für ein einheitliches Format für den Austausch von GPS-Beobachtungen empfohlen. Es wurde für die europäische EUREF-Kampagne 1989 verwendet, in der über sechzig Empfänger von vier Herstellern eingesetzt wurden. Es werden vier verschiedene Dateiformate unterschieden:

- Beobachtungsdatei (meist mit dem Suffix "rxo" oder "yyo" versehen, wobei yy abkürzend für die Jahreszahl (yy=00 => 2000) steht) mit den GPS/GLONASS- Beobachtungen
- GPS-Navigationsdatei (Suffix "rxn" bzw. "yyn") mit den GPS Broadcast-Ephemeriden
- GLONASS-Navigationsdatei ("rxg" bzw. "yyg") mit den GLONASS Broadcast-Ephemeriden
- Meteorologische Datei ("rxm" bzw. "yym") mit Atmosphärenzuständen (Temperatur, Luftfeuchte ...).

Die Übertragung der RINEX-Daten kann über das Telefon-Festnetz, über Mobilfunk, über Internet und FTP, aber auch einfach über die Versendung auf Datenträgern wie CD und Diskette geschehen.

Message-Typ	Status	Bezeichnung
1	fest	DGPS-Korrekturen
2	fest	DGPS-Korrekturänderungen
3	fest	GPS-Referenzstationsparameter
18	fest	RTK unkorrigierte Trägerphasen
19	fest	RTK unkorrigierte Pseudostrecken
20	fest	RTK Trägerphasen-Korrekturen
21	fest	RTK/Hochpräzise Pseudostrecken-Korrekturen
31	versuchsweise	Differentielle GLONASS-Korrekturen
32	versuchsweise	Differentielle GLONASS-Referenzstations-Parameter
37	versuchsweise	GNSS-System Zeit Offset
59	fest	nutzerdefiniert

Tabelle 3.3: Auswahl von Nachrichtentypen des RTCM 2.3-Formats.

3.3.2 Datenformate für Anwendungen in Echtzeit

Für Navigationsaufgaben mit hohen Anforderungen an die Genauigkeit der Positionsbestimmung wird die Übertragung von Korrekturdaten von einer Referenzstation zum Nutzer erforderlich. Für einfache DGPS-Anwendungen mit Metergenauigkeit reicht es aus, Korrekturdaten für die Codemessungen jedes auf der Referenzstation empfangenen Satelliten mit einer Datenrate von 3 s bis 5 s zu übermitteln. Für PDGPS-Anwendungen mit Genauigkeiten besser als 10 cm werden Träger- und Codephasendaten mit 1 Hz gesendet. Die Anforderungen für PDGPS-Verfahren an das Übertragungsformat und das -medium sind entsprechend höher.

Einheitliche Datenformate sind notwendig, um möglichst viele Nutzer eines DGPS-Dienstes zu erreichen. International anerkannt ist das speziell für marine Anwendungen entwickelte Format der *Radio Technical Commission For Maritime Services* (RTCM). Das RTCM-Format wird von nahezu allen GPS-Empfängern unterstützt, mit denen eine relative Echtzeit-Positionsbestimmung durchgeführt werden kann. Die Entwicklungsstufen der RTCM-Versionen zeigen die steigende Leistungsfähigkeit der GNSS-Positionsbestimmung auf.

Das RTCM-Format 1.0 von 1985 wurde 1990 durch die Version 2.0 ersetzt. Durch die Einführung von Pseudostrecken- und Pseudogeschwindigkeits-Korrekturen für jeden Satelliten sind mit diesem Format die Möglichkeiten einer DGPS-Positionsgenauigkeit von wenigen Metern und besser gegeben. Die Korrekturen werden auf der Referenzstation für jeden Satelliten aus dem Vergleich gemessener Pseudostrecken mit den aus bekannten Koordinaten und Bahnephemeriden berechneten Strecken abgeleitet. Auf der mobilen Station werden die dort gemessenen Pseudostrecken mit den Streckenkorrekturen verbessert. Dieses Konzept ermöglicht, dass großräumig Genauigkeiten von wenigen Metern und besser erreicht werden. Zusätzlich werden Informationen zu den verwendeten Referenzstationen ausgestrahlt. Laut [Wübbena und Bagge 1995] sind alle wesentlichen Informationen mit 1200 bps übertragbar.

Die RTCM-Version 2.1 vom Januar 1994 sieht neben den Informationen aus der Version 2.0 die Einführung von Trägerphasenmessungen vor. Die Standardabweichungen einer Positionsbestimmung erreichen durch Lösung der Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten durch OTF-Algorithmen bis zu 1 cm in Abhängigkeit von Satellitenkonstellation und entfernungsabhängigen Fehleranteilen. Wegen der zusätzlichen Informationen ist eine Datenübertragungsrate von mindestens 4800 bps notwendig [Wübbena und Bagge 1995]. Durch die Komprimierung der Korrekturdaten und Übertragung im nutzerdefinierten Typ 59 (*proprietary messages*, siehe Tabelle 3.3), sind

kompatibel zum RTCM-Format Raten unter 2400 bps für 12 Satelliten ab dem Format RTCM 2.1 möglich.

Die RTCM-Version 2.2 vom 15. Januar 1998 nimmt gegenüber der Version 2.1 Verallgemeinerungen vor, um die Nutzung mehrerer GNSS-Systeme (derzeit GPS und GLONASS) und deren Kombination zuzulassen. Es werden weiterhin Formate hinzugefügt, die die Übertragung differentieller GLONASS Korrekturen, Zeitinformationen zur Unterstützung der Datenaufzeichnung und genauere Antennenphasenzentrums-Koordinaten erlauben. Seit Mai 2001 liegt das RTCM-Format 2.3 vor, mit dem Modifikationen hinsichtlich der Verbesserung der Auflösung und Definition der Stationskoordinaten und der Einbringung von Antennenkalibrierungen eingeführt wurden.

3.3.3 Datenübertragung für Anwendungen in Echtzeit

Global operierende DGPS-Dienste nutzen üblicherweise die Übertragung der Korrekturdaten über geostationäre (z.B. INMARSAT) oder in niedrigen Bahnhöhen fliegende Kommunikationssatelliten (*low-earth-orbiter*, LEO). Dienste, wie zum Beispiel OMNISTAR, versorgen die Nutzer mit DGPS-Korrekturen, die Positionsgenauigkeiten von wenigen Metern erlauben.

Bei den terrestrischen Übertragungsverfahren gilt grundsätzlich nach [Heimberg 1994]:

- je größer die Wellenlänge, desto größer die Reichweite.
- je kürzer die Wellenlänge, desto höher die mögliche Datenrate.
- terrestrische Datenübertragungssysteme mit hoher Frequenz und kurzer Reichweite sind mit weniger technischem Aufwand zu installieren und kostengünstiger als Lang- oder Mittelwellenanlagen, mit denen aber größere Reichweiten erreicht werden.

Im Langwellenbereich (*low frequency*, LF; Wellenlänge $\lambda > 1000$ m, Frequenz $f < 300$ KHz) sind Datenübermittlungen über mehrere hundert Kilometer möglich, da die Signale der Erdkrümmung folgen. Als Beispiel für einen entsprechenden DGPS-Dienst kann hier das System ALF (*Accurate Positioning by Low Frequency*) im Rahmen des SAPOS genannt werden. Das *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie* und die *Deutsche Telekom AG* betreiben einen Sender in Mainflingen, von dem im 3-Sekunden-Takt Korrekturdaten für ganz Deutschland ausgesendet werden. LF-Sender benötigen eine hohe Sendeantenne und sind sehr energieintensiv.

Mittelwellensender (MF; $100 \text{ m} < \lambda < 1000$ m, $300 \text{ kHz} < f < 3000$ kHz) sind wesentlich kostengünstiger als LF-Sendeanlagen zu betreiben, bei relativ großen Sendereichweiten von bis zu 500 km. Die Frequenzen werden vielfach für Rundfunksender verwendet. Das MF-Band ist stark ausgelastet, daher ist es schwierig, eine eigene Frequenz für die Korrekturdatenübertragung nutzen zu können. Ein DGPS-Mittelwellensender für den marinen Bereich in der deutschen Bucht wird auf Helgoland betrieben, ein weiterer für die Ostsee in Wustrow.

Übertragungen im Ultra-Kurzwellen-Band (UKW, $1 \text{ m} < \lambda < 10$ m, $30 \text{ MHz} < f < 300$ MHz) sind auf die Horizontlinie beschränkt, ihre Reichweiten betragen abhängig von Sendeort und Sendeleistung mehrere Zehnerkilometer. Die Reichweite kann durch die Nutzung von Relaisstationen, an denen das Signal empfangen und wieder ausgesendet wird, verlängert werden. Für den SAPOS-Dienst (siehe Kapitel 3.3.4) strahlen öffentlich-rechtliche UKW-Sender im Unterträger RDS (*Radio Data System*) Korrekturdaten aus. Dieser RASANT- (*Radio-Aided-Satellite-Navigation-Technique*) EPS-Dienst ermöglicht wie bei den oben beschriebenen Medien eine Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von wenigen Metern.

Bezeichnung	Nutzer	Reichweite	Bandbreite	geeignet für
Funk 2-m	Broadcast	mehrere 10'er km	2400 bps	P-DGPS
Funk 70 cm	Broadcast	wenige km	9600 bps	P-DGPS
Funk LW	Broadcast	mehrere 100'er km	300 bps	DGPS
Funk UKW/RDS	Broadcast	mehrere 10'er km	100 bps	DGPS
Funk MW/AMDS	Broadcast	mehrere 100'er km	100 bps	DGPS
Satelliten	Broadcast	global	>2400 bps	DGPS
Mobilfunk/GSM	1 pro Kanal	EU: fast unbegrenzt	9600 bps	P-DGPS

Tabelle 3.4: Gängige terrestrische Datenübertragungskanäle nach [Wübbena und Bagge 1995].

Für die Positionsbestimmung mit PDGPS mit Genauigkeiten besser als 10 cm in Echtzeit sind höhere Datenraten und eine größere Informationsfülle erforderlich, als sie mit den oben beschriebenen Verfahren geleistet werden können. RTK-Hersteller bieten hierfür zumeist Funkanlagen mit einer Wellenlänge von $\lambda=70$ cm an, die bis zu einer Sendeleistung von 0.25 W in Deutschland genehmigungsfrei zu betreiben sind. Ihre Reichweite ist auf etwa 5 km beschränkt, üblicherweise wird in Bereichen bis maximal 2 km gearbeitet.

Der SAPOS-Dienst hat für die PDGPS-Anwendungen (HEPS) Genehmigungen für den Betrieb von UKW-Anlagen im 2-m-Band mit 10 W und 25 W. Hiermit sind Reichweiten von 25 km bis 35 km zu erreichen. Bei gezielt ausgerichteten Sende- bzw. Empfangsantennen kann die Datenübertragung auch über etwa 70 km erfolgen. Eine vollständige Überdeckung des gesamten Bundesgebietes mit dem 2-m-Band ist schwierig umzusetzen, da aufgrund der begrenzten Reichweite viele Sender installiert und für diese auch Frequenzen zugeteilt werden müssen, die sich nicht mit benachbarten Stationen überschneiden dürfen.

Eine weitere Möglichkeit der Funkübertragung ergibt sich aus der Nutzung der GSM-Technik der Mobiltelefone. Die Überdeckung mit Funktelefonnetzen ist in Deutschland gut und wird stetig ausgebaut. Nachteilig ist, dass die Anzahl der Nutzer der GSM-Technik durch die Anzahl vorhandener Modems auf der Referenzstation beschränkt wird. Bei den zuvor genannten Systemen ist grundsätzlich eine unbeschränkte Anzahl Nutzer eines Signals möglich, sofern die entsprechenden Empfangsgeräte vorhanden sind. Tabelle 3.4 gibt eine Übersicht über die gängigen terrestrischen Datenübertragungskanäle.

3.3.4 Beispiele für Referenzstationsdienste

Der globale Dienst *International GPS Service (IGS)*

Der IGS wurde 1994 nach einer Testphase von eineinhalb Jahren von der *Internationalen Assoziation für Geodäsie* (IAG) zur Unterstützung von geodätischen und geophysikalischen Forschungsaktivitäten eingerichtet. Insbesondere die präzisen Bahnephemeriden können auch für ingenieurgeodätische Aufgaben z.B. bei der Auswertung von GPS-Messungen in größeren Netzen herangezogen werden. Der IGS besteht laut <http://igsceb.jpl.nasa.gov> (Stand Februar 2002) aus 228 global verteilten GPS-Stationen. Die Messungen des IGS werden dem *International Earth Rotation Service* (IERS) zur Verfügung gestellt. Die GPS-Messungen fließen neben den Messungen mit *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI), *Lunar Laser Ranging* (LLR), *Satellite Laser Ranging* (SLR) und DORIS (*Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite*) bei der Definition des *International Terrestrial Reference System* (ITRS) beziehungsweise bei seiner Realisierung durch die Koordinaten und Geschwindigkeiten der Stationen des *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) des IERS ein.

Verfügbarkeit Produkte	Endgültig nach 2 Wochen	Schnell nach 2 Tagen	Vorhersage in Echtzeit
Ephemeriden	< 5 cm	5 cm	ca. 25 cm
Satellitenuhren	0.1 ns	0.2 ns	ca. 5 ns
Polkoordinaten	0.1 mas	0.2 mas	-
Polbewegungen	0.2 mas/day	0.4 mas/day	-
UT1-UTC	50 μ s	300 μ s	-
Tageslängen	20 μ s/day	30 μ s/day	-
Stationskoordinaten			-
Position horizontal	3 mm		-
Position vertikal	6 mm		-
Geschwindigkeit horizontal	2 mm / a		-
Geschwindigkeit vertikal	3 mm / a		-

Tabelle 3.5: Genauigkeiten der IGS-Produkte nach <http://igsb.jpl.nasa.gov> (Stand 27.02.2002) und [Rothacher 1999].

Die GPS-Messungen werden in drei globalen Datenzentren gesammelt (*Crustal Dynamics Data Information System* (CDDIS, USA), *Scripps Institution of Oceanography* (SIO, USA), *Institut Geographique National* (IGN, Frankreich)). Dort können sie von sieben regionalen Analysezentren zur Bearbeitung und Berechnung von individuellen Lösungen für Satellitenbahnen und Erdrotationsparameter abgerufen werden. Die Ergebnisse werden zur Berechnung einer endgültigen Lösung an den Koordinator des Analysezentrum weitergereicht.

Der IGS stellt dem Nutzer die folgenden Produkte zur Verfügung:

- präzise GPS-Bahninformationen,
- Erdrotationsparameter,
- Koordinaten und Geschwindigkeiten der IGS Stationen,
- Informationen zu den Uhren der GPS-Satelliten und der GPS-Empfänger auf den IGS-Stationen,
- Troposphären- und Ionosphäreninformationen.

Die Genauigkeit der Produkte ist abhängig von der Schnelligkeit, in der die Produkte zur Verfügung gestellt werden können. Die Genauigkeiten nach <http://igsb.jpl.nasa.gov> (Stand Februar 2002) und [Rothacher 1999] sind in Tabelle 3.5 zusammengestellt.

Weitergehende Informationen sind [Rothacher 1999], [Gendt 1997] und [Reigber 1997] zu entnehmen.

Der globale Dienst *Global Differential GPS System (GDGPS)* des JPL

In [Muellerschoen et al. (2001)] wird das *Global Differential GPS* (GDGPS) beschrieben, eine Entwicklung des *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) für die *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) in den USA. Die in Echtzeit erreichbaren Genauigkeiten für Zweifrequenz-Empfänger werden weltweit mit besser als 20 cm für die Höhe und besser als 10 cm für die horizontale 2D-Position mit einer Verzögerung von zumeist 1.5 s bis 3 s angegeben.

Das Verfahren basiert auf der Modellierung eines Zustandsraumes für jede Satellitenepoche. Durch die Nutzung von Zweifrequenz-Empfängern wird der Zustand der Ionosphäre in erster Näherung eliminiert (siehe Kapitel 4). Die Korrektur der GPS-Ephemeriden und Uhrfehler werden aus dem globalen Netz abgeleitet, das aus 60 Stationen des *NASA Global GPS Network* (GGN) des IGS besteht. Troposphärenparameter werden für jede Station bestimmt. Der Datenaustausch in Echtzeit wird über das Internet realisiert. Das System befindet sich zurzeit im Aufbau.

Der kontinentale Dienst *EUREF-Permanent*

Die Subkommission EUREF der *IAG-Commission X (Global and Regional Geodetic Networks)* beschäftigt sich seit 1987 mit der Einrichtung, Unterhaltung und Fortentwicklung des dreidimensionalen Europäischen Terrestrischen Referenzsystems (ETRS). Seit 1994 fließen die Beobachtungen sämtlicher europäischer IGS-Stationen und Permanentstationen systematisch zur Unterhaltung des ETRS ein. Im Februar 2002 wurden laut <http://www.epncb.oma.be> 137 EUREF-Permanent-Stationen betrieben.

Die GPS-Daten werden zentral bei dem IGN in Paris und bei dem *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie* (BKG) in Frankfurt gespeichert. Die tägliche Auswertung wird von zehn lokalen Analysezentren durchgeführt, die jeweils mindestens drei günstig benachbarte Stationen als Ankerstationen mit in ihre Berechnungen einbeziehen. Die täglichen Resultate werden zu Wochenlösungen zusammengefasst und an das Zentrum für Bahnbestimmung am BKG weitergeleitet. Dort werden Gesamt-, Tages-, Wochen- und Kombinationslösungen errechnet. Diese Ergebnisse werden wiederum an den IGS und damit auch an den IERS weitergegeben [Weber et al. 1999].

Der nationale Dienst *SAPOS*

In vielen Staaten werden von staatlichen Institutionen landesweit permanente Referenzstationsdienste zur Realisierung und Aufrechterhaltung eines dreidimensionalen Referenzsystems (z.B. *German Geodetic GPS Reference Network* (GREF) des BKG für Deutschland) und für die präzise Positionsbestimmung mit Hilfe des DGPS eingerichtet.

Ein Beispiel für einen Referenzstationsdienst, der von behördlichen Vermessungsstellen aufgebaut wird, ist SAPOS, der *Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessungen*. Die Referenzstationen entsprechen Standards, die von der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Bundesrepublik Deutschland (AdV) definiert wurden. Dem Nutzer stehen abgestufte Genauigkeitsbereiche sowohl für Echtzeitanforderungen als auch für das Postprocessing zur Verfügung, die von 5 m für DGPS-Anwendungen bis hin zu 1 cm und besser reichen. Unterschieden werden die Servicebereiche:

- EPS - Echtzeit Positionierungs-Service,
- HEPS - Hochpräziser Echtzeit Positionierungs-Service,
- GPPS - Geodätisch Präziser Positionierungs-Service und
- GHPS - Geodätisch Hochpräziser Positionierungs-Service.

Eine Übersicht über die Leistungskriterien der Servicebereiche gibt Tabelle 3.6.

Dem SAPOS ähnliche Systeme sind zum Beispiel in Schweden (SWEPOS), Norwegen (SATREF) und in der Schweiz (SWIPOS) eingerichtet. Zunehmend werden auch von kommerziellen Anbietern derartige Referenzstationsdienste angeboten.

Service-Bereich	Verfügbarkeit	Medium	Nutzer gleichzeitig	Genauigkeit	Taktrate	Schnittstelle
EPS	Echtzeit	LW/UKW	∞	1 - 3 m	3 - 5 s	RTCM 2.0
EPS	Echtzeit	2-m-Band	∞	1 - 3 m	1 s	RTCM 2.0
HEPS	Echtzeit	2-m-Band/GSM	∞	1 - 5 cm	1 s	RTCM 2.1
GPPS	echtzeitnah	GSM	$n \ll \infty$	1 cm	wählbar	RINEX
GPPS	Postprocessing	Festnetz	∞	1 cm	wählbar	RINEX
GHPS	Postprocessing	Festnetz	∞	< 1 cm	wählbar	RINEX

Tabelle 3.6: Leistungskriterien der SAPOS-Servicebereiche nach [Hankemeier und Engel 1998].

3.4 GNSS-Echtzeit-Messsystem GNRT

Die Auswertung der GPS-Beobachtungen wurden in dieser Arbeit im Postprocessing mit dem Programmpaket GEONAP und in Echtzeit mit den Programmpaketen GNRT, GNREF und GNNET der Firma Geo++[®], Gesellschaft für satellitengestützte und navigatorische Technologien mbH, vorgenommen. Die grundlegenden Konzepte und die Funktionsweise von GEONAP werden in [Wübbena 1991] beschrieben. Diese Konzepte liegen auch den Echtzeitsystemen zu Grunde.

GEONAP und GNRT basieren auf der undifferenzierten Auswertung der Beobachtungen, bei der die wirksamen Fehlereinflüsse auf die Messungen modelliert werden (Parameterschätzung). Gegenüber dem vielfach verbreiteten Verfahren der Parameterelimination durch Differenzbildung weist dieses Konzept den Vorteil auf, dass es universeller einsetzbar ist und alle Varianz- und Kovarianzinformationen der stochastischen Modellbildung streng weiterverarbeitet werden können. Sowohl mit GNRT als auch mit GEONAP werden die Daten mehrerer Stationen simultan ausgeglichen. Mit diesem Multistationsansatz sind Modellierungen von großräumigen Zuständen (Fehlereinflüsse) durch eine Vielzahl von Sensorstationen und die gemeinsame Auswertung eines Mehrantennensystems auf einem Messfahrzeug zur Lagebestimmung möglich. Desweiteren können mehrere Frequenzen gleichzeitig ausgewertet werden, so dass nicht nur die L1- und L2-Beobachtungen des GPS genutzt werden können, sondern auch die unterschiedlichen GLONASS-Frequenzen und konzeptionell auch die Frequenzen zukünftiger satellitengestützter Navigationssysteme.

Der empfängerunabhängige und modulare Aufbau der Programme erlaubt es, mehrere Empfängertypen gleichzeitig auszuwerten und Spezialanwendungen relativ schnell zu implementieren. Diese Merkmale und die Ähnlichkeit zwischen Postprocessing- und Echtzeitprogramm erleichtern detaillierte Untersuchungen und Weiterentwicklungen der Anwendungen. Im Folgenden wird der Aufbau der Echtzeit-Programmpakete und deren Hauptmodule beschrieben. Alle Entwicklungen und Untersuchungen hinsichtlich der GPS-Auswertung und INS-Integration wurden unter dem Betriebssystem OS/2 von IBM durchgeführt.

Zum Verständnis des Programmpakets GNRT und der späteren Integration weiterer Sensoren wird ein kurzer Einblick in das Betriebssystem OS/2 gegeben.

3.4.1 Betriebssystem OS/2

Ein multi-funktionales, modular aufgebautes und zugleich echtzeitfähiges Messsystem stellt komplexe Anforderungen an das Rechnerbetriebssystem. Für die Parallelverarbeitung der Daten ist ein *multi-threading*- und *multi-tasking*-fähiges Echtzeit-Betriebssystem günstig. Auf *multi-*

threading-Plattformen können einzelne Programme mehrere Transaktionen zu einem Zeitpunkt ausführen. *Multi-tasking* bezeichnet die Fähigkeit eines Betriebssystems, mehrere Programme gleichzeitig prozessieren zu können. Beides sind wichtige Voraussetzungen für ein Betriebssystem, das ohne merkbare Verzögerung verschiedene, von außen einwirkende Ereignisse (engl. *events*) verarbeiten und speichern kann. Echtzeit-Betriebssysteme sollten minimale Speicherkapazitäten benötigen, hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten und eine maximale Sicherheit vor Systemabstürzen und Ausfällen bieten.

Die Datenverarbeitung in Echtzeit wird unter OS/2 durch die Möglichkeit der *pipe*-Prozessierung vereinfacht. Eine *pipe* (engl. für Röhre) beschreibt eine gepufferte Datenverbindung zwischen zwei Prozessen, die von einem Prozess beschrieben und von einem anderen Prozess eingelesen wird, so dass die Ausgabe des schreibenden Prozesses sofort als Eingabe für andere Prozesse zur Verfügung steht. Im *shared-memory*-Bereich werden Daten und Ergebnisse von Programmen gespeichert, auf die andere Programme zugreifen können. Um die Datenströme unterscheiden zu können, werden im Programmpaket GNRT die Bezeichnungen der Datenquellen (*rcv_id*, zum Beispiel für Empfängernamen, Punktnummern) und der verarbeitenden Programme (*owner*) eingeführt.

Die ersten Untersuchungen mit GNRT wurden auf handelsüblichen Notebooks mit 486DX33-Prozessoren und 8 MB RAM durchgeführt. Dies ist gleichzeitig die Minimalforderung an die eingesetzten Rechnersysteme bei Einsatz von OS/2 Version 2.1. Für höhere OS/2-Versionen sind Pentium-Rechner mit mindestens 16 MB RAM ratsam. Diese Vorgaben stellen heutzutage kein Problem dar. Näheres zum Betriebssystem OS/2 ist in [Koch et al. 1995] dargestellt.

3.4.2 Kernmodule des Messsystems

GNRT wird auf dem Betriebssystem OS/2 entwickelt und betrieben, das Betriebssystem Windows NT wird ebenfalls unterstützt. Die sequentielle Abarbeitung der GPS-Daten teilt sich üblicherweise in Vorverarbeitung, Mehrdeutigkeitssuche und Positionsbestimmung auf. Im Postprocessing werden diese Schritte über alle Epochen nacheinander, in Echtzeit simultan epochenweise durchgeführt. Abbildung 3.1 zeigt ein Ablaufdiagramm der GNRT-Verarbeitung.

Die Rohdatenformate der GNSS-Empfänger unterscheiden sich für jeden Hersteller, zum Teil sogar in Abhängigkeit der aufgespielten Betriebssoftware (*firmware*). Mit sogenannten Empfängermodulen (in Abbildung 3.1 allgemein mit *rcv_in* bezeichnet) werden die Rohdaten über serielle Schnittstellen eingelesen und in das GNRT-eigene Format umgewandelt. Für Postprocessing-Anwendungen können die Daten im RINEX-Format (siehe Kapitel 3.3.1) abgespeichert werden.

Neben dem Einlesen von Empfängerrohdaten können RTCM-Korrekturdaten anderer Stationen in die Auswertung eingeführt werden. Das Einlesen wird durch das Modul *rtcm_in* zum Beispiel über serielle Schnittstellen vorgenommen. Ebenso wie mit *rcv_in* können die Daten im RINEX-Format abgespeichert werden.

Die Kernmodule *GNRT* und für Referenzstationsanwendungen *GNREF* setzen beispielsweise auf eine von *rcv_in* oder *rtcm_in* erstellte Struktur auf. Die Beobachtungen werden linearisiert und ggf. werden DGPS-Korrekturen angebracht. Weiterhin können Phasenzentrumskorrekturen bzw. Exzentrizitäten berücksichtigt werden, wobei insbesondere in kinematischen Anwendungen auch die Orientierung der Antenne zur Reduzierung eingeführt werden kann.

Für Mehrdeutigkeitslösungen stehen die Module GNRT-K für einzelne Stationen beziehungsweise GNNET für Multistationslösungen zur Verfügung. Sie beziehen ihre Daten von mehreren Schnittstellen. Konzeptionell ist die Anzahl einzulesender Daten nicht begrenzt. Die Zustandsmodellierung der Satellitenbahnen, Ionosphäre, Troposphäre usw. können variabel entsprechend

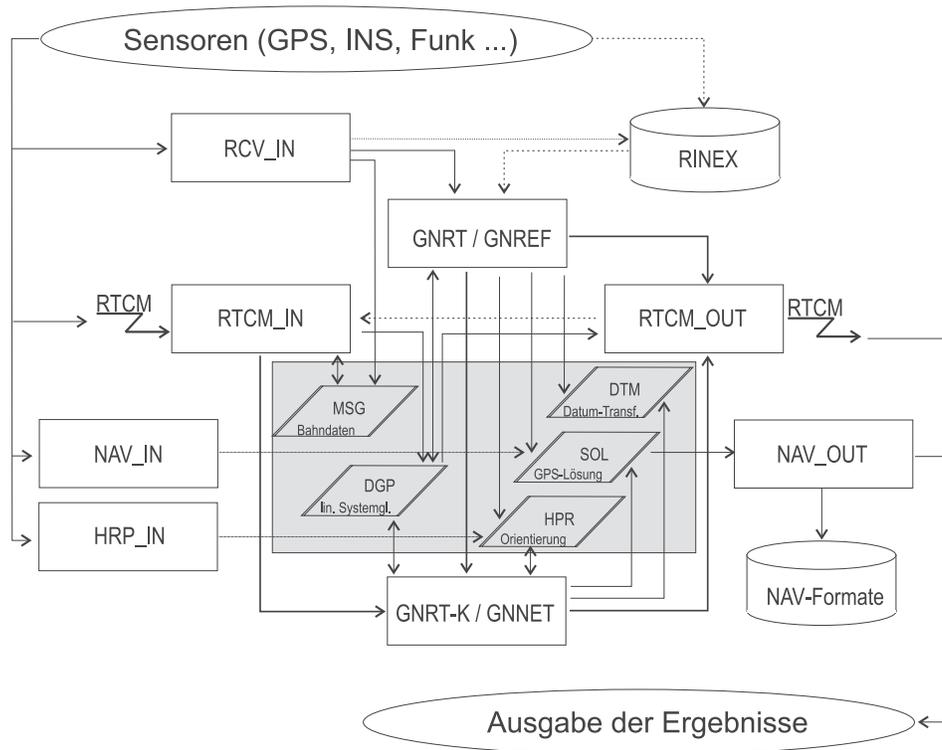


Abbildung 3.1: Ablaufdiagramm des Echtzeit-Programmpakets GNRT. Grau unterlegt: *shared memory*; gestrichelt: üblicherweise für Anwendungen im Postprocessing.

den Gegebenheiten eingeführt werden. L1- und L2-Mehrdeutigkeiten werden simultan gelöst, die Positionsbestimmung wird ebenfalls unter Nutzung beider Frequenzen vorgenommen. Als weitere Ein- und Ausgabeschnittstellen zu anderen Systemen dienen die Module *nav_out* und *nav_in* für Positionslösungen und *rtcm_out* für RTCM-Korrekturen.

Kapitel 4

Entfernungsabhängige Fehleranteile der GPS-Positionsbestimmung

In Kapitel 3.2 wird der GPS-Fehlerhaushalt nach entfernungsabhängigen und stationsabhängigen Wirkungen unterteilt. Unter anderem sind die GPS Messgrößen durch atmosphärische Ausbreitungsverzögerungen und Bahnfehler mit Fehleranteilen behaftet. Bei relativen DGPS Positionsbestimmungen sind die Auswirkungen der Fehler mit der Entfernung zu den Referenzstationen korreliert: je größer die Entfernung, desto größer die Auswirkung auf die Positionsbestimmung des Rovers.

Besonders in marinen Anwendungsbereichen ist eine Vernachlässigung dieser Fehler problematisch, da die Zahl der Referenzstationen im Meeresbereich nicht beliebig erhöht werden kann. Die Stationen werden üblicherweise auf dem Festland und auf Inseln installiert. Im Meeresbereich mangelt es für hohe Genauigkeitsansprüche an bewegungsinvarianten Montierungsmöglichkeiten. Im Folgenden sollen die entfernungsabhängig wirkenden Fehlereinflüsse und ein Ansatz zu deren Reduzierung dargestellt und untersucht werden.

4.1 Einflüsse der Atmosphäre

Elektromagnetische Wellen werden bei dem Übergang von einem Medium in ein anderes gebrochen (Brechung, Refraktion). Die Stärke der Brechung wird durch die relative Dielektrizitätskonstante ϵ_{ri} beziehungsweise durch die Brechzahl n_i eines Mediums bestimmt. Die Brechzahl n_i (auch: Brechungsindex) berechnet sich aus dem Quotienten der Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 und der Geschwindigkeit c_i , mit der sich die elektromagnetische Welle durch das Medium i bewegt.

$$n_i = \frac{c_0}{c_i} = \sqrt{\epsilon_{ri}}. \quad (4.1)$$

Die Laufzeit von GPS-Signalen wird auf dem Weg durch die verschiedenen Atmosphärenschichten verlängert. Dementsprechend werden die auftretenden Effekte auf die Signale als Ausbreitungsverzögerungen bezeichnet. Bei genauer Kenntnis der Atmosphärenschichten und deren Brechzahlen entlang des Signalwegs kann der Einfluss bestimmt werden. Diese Informationen sind jedoch in aller Regel nicht gegeben.

Für die Modellierung der Auswirkungen auf die GPS-Messungen wird die Atmosphäre aufgrund der unterschiedlichen Brechungseigenschaften der Medien in Ionosphäre und Troposphäre unterteilt.

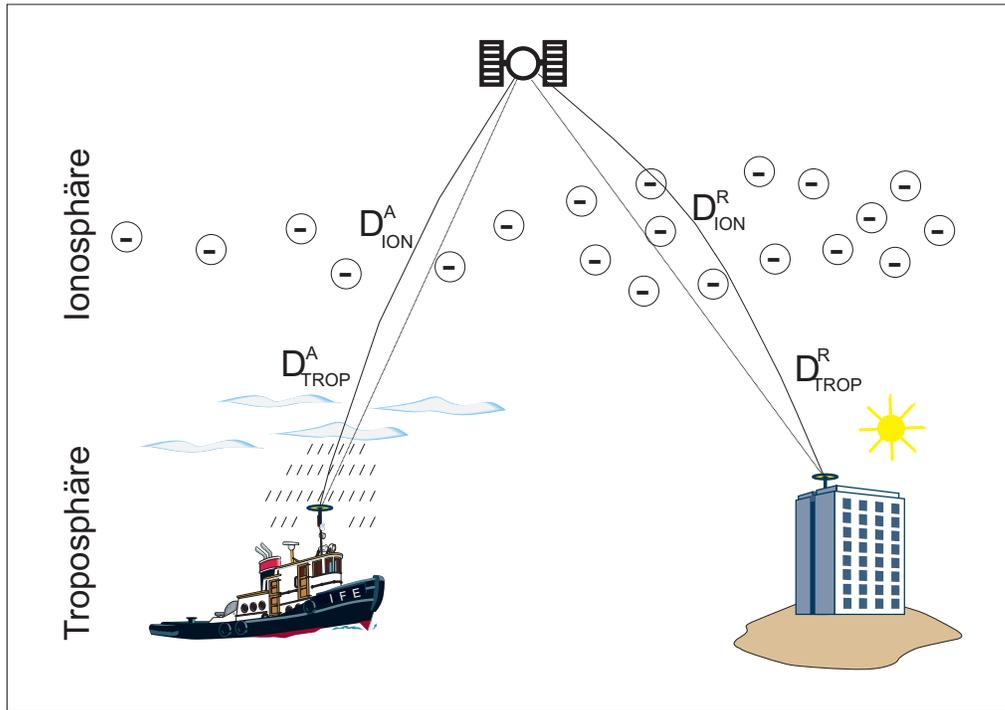


Abbildung 4.1: Ausbreitungsverzögerungen in der Atmosphäre.

4.1.1 Ionosphäre

In den oberen Schichten der Atmosphäre, etwa ab 80 km bis 800 km Höhe, werden Gaspertikel durch die Strahlung der Sonne zum Teil ionisiert. Die Ionisierung wird zusätzlich durch chemische Zusammensetzungen beeinflusst und durch Diffusion und Winde in den Schichten verlagert. Die Zone der größten Elektronen-Konzentration befindet sich zwischen 250 km und 400 km und wird auch als F-Zone bezeichnet. Die Ionosphäre ist ein hoch variables und komplexes System, dem entsprechend sind die genannten Höhenangaben nur als Näherungswerte zu betrachten.

Die Ionosphäre ist ein dispersives Medium, d.h. der Brechungsindex der Ionosphäre ist abhängig von der Frequenz des elektromagnetischen Signals. Er wird meist in einer Potenzreihe entwickelt und nach wenigen Gliedern abgebrochen [Wübbena 1991]. Der Einfluss δR_I auf die Streckenmessung in [m] mit den GPS-Trägerphasen wird in erster Ordnung aus der folgenden Gleichung abgeleitet:

$$\delta R_{I,ph} = -\frac{B_I}{f^2} \quad (4.2)$$

mit

$$B_I = \frac{A}{2} \frac{1}{\cos z_I} \int_0^{h_I} N_e(h) dh \quad (4.3)$$

und

- f Frequenz der Trägerphasen (L1 und L2)
- A Konstante ($80.6 \frac{m^3}{s^2}$)
- z_I Zenitdistanz der geometrischen Verbindung von Empfänger zu Satellit
- h_I mittlere Ionosphärenhöhe
- N_e Dichte der freien Elektronen (Elektronendichte) [m^{-3}].

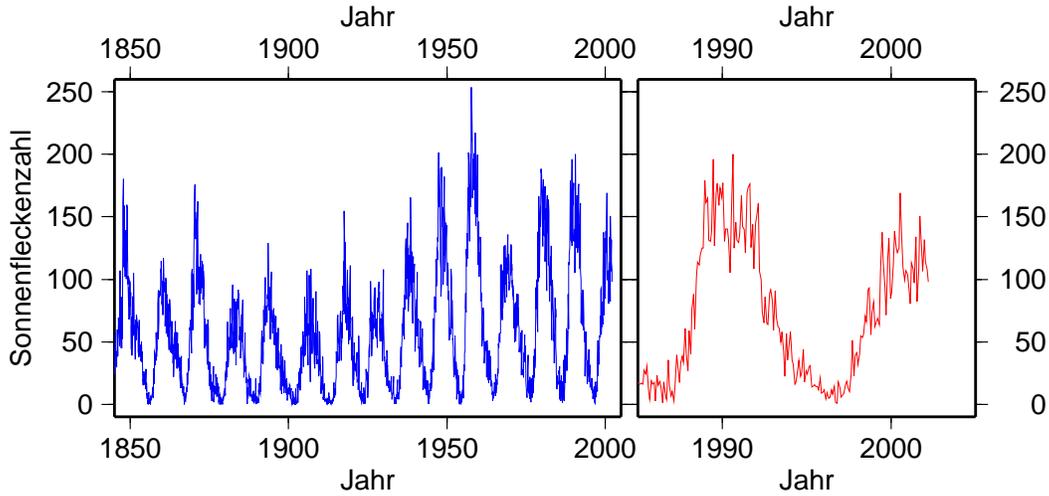


Abbildung 4.2: Anzahl der Sonnenflecken seit 1845. Links: Die Sonnenzyklen 22 und 23.

Das Integral $\int_0^{h_I} N_e(h)dh$ wird auch als *Vertical Total Electron Content* (VTEC) bezeichnet. Für die Trägerphasenmessung im Zenit berechnet [Wanninger 1994] aus Modellannahmen maximale ionosphärische Streckenfehler des Terms 1. Ordnung mit -32.5 m für L_1 und -53.5 m für L_2 .

Die Codephasen breiten sich mit der Gruppengeschwindigkeit c_{gr} aus, diese wird berechnet nach:

$$c_{gr} = \frac{c_0}{n_{gr}} \quad (4.4)$$

mit

$$n_{gr} = n + f \cdot \frac{dn}{df}. \quad (4.5)$$

Der Term 1. Ordnung der oben beschriebenen Reihenentwicklung für die Codmessung nimmt denselben absoluten Wert an wie der entsprechende Term der Phasenmessung, jedoch mit positiven Vorzeichen. Daher löschen sich ionosphärische Effekte 1. Ordnung bei Kombination von Code- und Phasenmessung aus.

$$\delta R_{I,gr} = \frac{B_I}{f^2} \quad (4.6)$$

Für die ionosphärenfreie Linearkombination L_0 heben sich die Effekte 1. Ordnung auf. Effekte 2. Ordnung können bis zu ± 0.036 m für L_1 (L_2 : ± 0.076 m, L_0 : ± 0.026 m) im Zenit betragen und sind somit für hochpräzise Anwendungen kritisch zu betrachten. Die Auswirkungen der Entwicklungsglieder tieferer Ordnungen liegen im Zenit unterhalb von 0.01 m und auch bei 10° bei maximal 0.01 m für L_0 .

Bedingt durch erhöhte Sonnenaktivitäten kann es zu verstärkten, kurzzeitigen Störungen der Ionosphäre (Szintillationen) kommen. Sie führen häufig zu Phasensprüngen und somit zum Verlust der Mehrdeutigkeiten. Besonders starke Gradienten der ionosphärischen Einflüsse werden in den Maxima der Sonnenzyklen gemessen. In Zeiten, in denen ein Maximum an Sonnenflecken auf der Sonne zu erkennen ist, verstärken sich Protuberanzen und Sonnenwinde und lösen Turbulenzen in der Ionosphäre der Erde aus. Die Maxima der Zyklen traten in den letzten Jahrhunderten relativ regelmäßig etwa alle 11 Jahre auf (siehe Abbildung 4.2). Der aktuell letzte Sonnenzyklus ist mit der Nummer 23 bezeichnet und hat wahrscheinlich sein Maximum im Jahr 2001 durchlaufen.

4.1.2 Troposphäre

Die Troposphäre ist die unterste Schicht der Atmosphäre und wird am Pol in etwa 8 km und am Äquator in etwa 17 km Höhe von der Tropopause begrenzt. Allgemein wird jedoch unter den Ausbreitungsverzögerungen in der Troposphäre auch jene der Mesosphäre und der Stratosphäre verstanden. In diesem Bereich findet generell das Wettergeschehen der Erde statt. Im Gegensatz zur Ionosphäre ist die Troposphäre für Frequenzen bis 15 GHz kein dispersives Medium, die Brechung der Strahlen ist unabhängig von der Frequenz des Satellitensignals.

Haupteinflussfaktor für die Ausbreitungsverzögerung der GPS-Signale ist der Wasserdampfgehalt in der Troposphäre. Der Brechungsindex von elektromagnetischen Wellen in der Luft kann über die Trennung in einen "trockenen" Anteil N_d und in einen "feuchten" Anteil N_w aus der absoluten Temperatur T in [K], dem Luftdruck p in [hPa] und dem partiellen Wasserdampfdruck e in [hPa] zerlegt und berechnet werden.

$$N_T = N_d + N_w = 77.6 \cdot \frac{p}{T} + 77.6 \cdot 4810 \cdot \frac{e}{T^2} \quad (4.7)$$

Die Modellierung des troposphärischen Ausbreitungsverzögerung δT kann beispielsweise abgewandelt nach [Hopfield 1969] über die Formelbeziehungen

$$\delta T = \delta T_d + \delta T_w = \frac{10^{-6}}{5} \cdot (N_{d,0} \cdot h_d \cdot m_d + N_{t,0} \cdot h_w \cdot m_w) \quad (4.8)$$

mit

$$h_d = 40136 + 148.72 \cdot (T - 273.16) \text{ [m]}$$

$$h_w = 11000 \text{ [m]}$$

$$m_d = \frac{1}{\sin \sqrt{E^2 + 6.25}}$$

$$m_w = \frac{1}{\sin \sqrt{E^2 + 2.25}}$$

mit der Elevation E in [°] durchgeführt werden. Der "trockene" Anteil der Troposphärenkorrektur wirkt bis zu einer Höhe von etwa $40 \text{ km} < h_d < 45 \text{ km}$ über dem Erdboden, während der Bereich, in dem der "feuchte" Anteil eine Rolle spielt, generell mit $h_w = 11 \text{ km}$ oder 12 km angenommen wird. Der "trockene" Anteil nimmt nach [Hofmann-Wellenhof et al. 2001] etwa 90% der gesamten Troposphärenkorrektur an. Die Abhängigkeiten der Korrektur von der Elevation des einfallenden Satellitensignals werden durch die *mapping*-Funktionen m_d und m_w modelliert. Desweiteren finden die folgenden Modelle Anwendung:

- das *Modified Hopfield Model*. Hier werden statt den Höhen h_d und h_w Positionsvektoren zur Modellierung verwendet.
- das Modell nach [Saastamoinen 1973] wird aus physikalischen Gasgesetzen hergeleitet.
- die Modelle nach [Herring 1972] und [Niell 1996] variieren die *mapping*-Funktionen.

In GPS-Auswerteprogrammen werden die Troposphärenparameter vielfach in einem Ausgleichungsprozess ohne externe Wetterbeobachtungen bestimmt. Dabei kann die Schätzung der Parameter durch Resteffekte bei fehlerhafter Modellierung der Phasenzentrumsvariationen und der Mehrwegeeffekte negativ beeinflusst werden. Ungenaue Annahmen bei der Troposphärenmodellierung schlagen sich zum großen Teil auf die Genauigkeit der GPS-Höhenbestimmung aus.

4.2 Einflüsse des Raumsegmentes

Die Fehlereinflüsse des Raumsegmentes unterteilen sich in:

- Bahnfehler der Satelliten,
- Variationen der Phasenzentren und des Multipath der Satellitenantenne,
- Laufzeitverzögerungen in der Satellitenhardware und
- GPS-Systemsicherungstechniken *Selective Availability* (SA) und *Anti-Spoofing* (A-S).

Zur Koordinatenbestimmung mit GPS werden die Bahnephemeriden der Satelliten als bekannt vorausgesetzt. Die in Echtzeit mit den Satellitenmessages gesendeten Broadcast-Ephemeriden geben eine prädierte Position (GPS: Kepler-Parameter, GLONASS: Bahnkoordinaten) bezogen auf einen bestimmten Zeitpunkt aus. Die Genauigkeit dieser Positionen hängt wesentlich von der Verteilung der Bodenkontrollstationen (engl.: *ground control stations*) ab. Im Falle des GPS gewährleistet die weltweit gute Überdeckung eine Genauigkeit von wenigen Metern, sofern SA nicht eingeschaltet ist. Für Anwendungen im Postprocessing können von Referenzstationsdiensten präzise Ephemeriden bezogen werden. Das IGS bietet nach 2 Tagen bereits Ephemeriden mit einer Genauigkeit von 0.05 m an (siehe Tabelle 3.5).

Zu den Variationen der Phasenzentren der Satellitenantennen und zum Multipath am Satelliten ist bisher wenig bekannt. Aus Diskrepanzen in der Größenordnung von etwa 11 *parts-per-billion* (ppb) zwischen IGS-Lösungen mit absolut kalibrierten Antennen auf den Erdstationen und dem ITRF-2000 folgert [Rothacher 2000], dass unzulängliche Annahmen über die Lage dieser Phasenzentren getroffen werden. Untersuchungen mit absoluten Antennenkalibrierungen im IGS-Netz haben ergeben, dass ein ungeklärter Maßstabsfaktor gegenüber den Ergebnissen der VLBI-Messungen auf eine Verschiebung des Offsets um etwa 2 m Richtung Erde hinweisen könnte. [Mader und Czopek 2001] hatten erstmalig die Möglichkeit, eine Satellitenantenne des Typs Block-IIA zu kalibrieren. Dabei zeigte sich, dass der für die Bahnbestimmung maßgebliche Offset der ionosphärenfreien Linearkombination L_0 um etwa 70 cm von den bisher veröffentlichten Annahmen abweicht. Durch Verwendung der Satellitenantennen-Kalibrierung werden die angesprochenen Diskrepanzen von 11 ppb auf etwa 5 ppb reduziert. Die verwendete Antenne wird in einer späteren Prozedur für den Einsatz auf dem Satelliten neu abgestimmt, wobei jedoch keine Änderungen des Offsets in der Größenordnung der Ergebnisse erwartet werden. Die bereits im Orbit befindlichen Satellitenantennen sind nicht kalibriert worden, so dass keine gesicherten Aussagen zur Lage der Phasenzentren gemacht werden können.

Zum Schutz der Interessen des amerikanischen Betreibers wurden in den GPS-Block II-Satelliten Möglichkeiten zur Systemsicherung implementiert, die die Verfügbarkeit der Signale und die Genauigkeit des Systems für den nicht autorisierten Nutzer einschränken. Bei der *selective availability* (SA) werden durch die Veränderung der Uhrparameter durch die *dithering*- und durch die ϵ -Technik die Werte der Bahnephemeriden der Satelliten künstlich verschlechtert. Seit dem 01. Mai 2000 [Clinton 2000] ist der SA-Effekt auf Dauer abgestellt worden. Genauigkeiten von wenigen Metern ohne DGPS-Verfahren werden somit ermöglicht. Das *Anti-Spoofing* (A-S) verschlüsselt den präzisen P-Code für nicht autorisierte Nutzer und somit den direkten Zugang zu den Messungen auf der L2-Frequenz. Durch geeignete Techniken lässt sich jedoch die L2-Trägerphasenmessung in herkömmlichen geodätischen Empfängern rekonstruieren. Bei dem GLONASS-System sind keine derartige Systemsicherungstechniken vorgesehen.

Den Einfluss eines Bahnfehlers dr auf die Genauigkeit einer relativen Positionsbestimmung db wird nach [Seeber 1993] über die Entfernung zum Satelliten ρ in Abhängigkeit von der Basislinienlänge b vereinfacht mit der Formel 4.9 beschrieben.

$$db = b \cdot \frac{dr}{\rho} \quad (4.9)$$

Wird zum Beispiel $\rho = 25.000$ km für niedrig stehende Satelliten und $dr = 5$ m für Broadcast-Ephemeriden ohne SA gesetzt, dann ergibt sich ein entfernungsabhängiger Fehleranteil von 0.2 ppm. Unter SA-Bedingungen kann derart beispielhaft mit einem $dr = 50$ m ein Effekt von 2 ppm auf die Positionsbestimmung abgeleitet werden.

4.3 Reduzierung entfernungsabhängiger Fehleranteile

Für Codephasenlösungen wurden frühzeitig *Wide Area Differential GPS*-Systeme (WADGPS) entwickelt, um die entfernungsabhängigen Fehleranteile zu reduzieren. Für die genaueren Phasenlösungen wurde dies aber zunächst nur in Deutschland vorangetrieben. Erfahrungen u.a. aus der Auswertung der DREF-Kampagne zeigten, dass die GPS-Positionsbestimmung besonders in Zeiten erhöhter Sonnenaktivitäten durch ionosphärische Einflüsse wesentlich erschwert wird. Im Wesentlichen können bei Referenzstationsbetreibern zwei Verfahren angewendet werden, um dem entgegen zu wirken:

- Virtuelle Referenzstationen (VRS),
- Vernetzung von Referenzstationen mit Modellierung der Fehlereinflüsse über Flächenkorrekturparameter (FKP).

Beide Verfahren nutzen die Beobachtungen aus einem Netz mehrerer Referenzstationen.

4.3.1 Virtuelle Referenzstationen (VRS)

Das Konzept der virtuellen Referenzstation nach [Wanninger 1997] sieht vor, aus mehreren Referenzstationen einen neuen, von entfernungsabhängigen Einflüssen weitgehend bereinigten Datensatz bezüglich einer Näherungskordinate der Roverstation zu berechnen. Die Näherungsposition kann durch eine GPS Einzelstationslösung gewonnen werden. Die Koordinate beschreibt die virtuelle Referenzstation, die somit nur wenige Meter von der tatsächlichen Position des Rovers berechnet wird. Die Positionsbestimmung bezüglich dieser Koordinate wird von entfernungsabhängigen Fehlereinflüssen nur noch in vernachlässigbarem Maße beeinflusst.

Das Konzept eignet sich gut für statische Messungen im Postprocessing oder echtzeitnah. Für kinematische Anwendungen in Echtzeit stößt das Verfahren auf Probleme. Üblicherweise wird die Näherungsposition des Rover an eine Schnittstelle des Referenzstationsnetzes gesendet, bei der die Daten der virtuellen Station berechnet werden. Nach Abschluss der Berechnungen werden die Daten an den Rover gesendet. Das Design des Kommunikationsnetzes muss deshalb auch einen Übertragungskanal zum Referenzstationsnetz (*uplink*) vorsehen. Bei simultaner Nutzung des Systems durch mehrere Nutzer wird der Rechenaufwand an der Referenzstation wesentlich erhöht. Bei bewegtem Rover muss in den Berechnungen die Näherungskordinate nachgeführt werden. Soll die Berechnung der virtuellen Referenzstation auf dem Rover stattfinden, so müssen die Daten der für die Messungen relevanten Referenzstationen des Netzes am Rover verfügbar

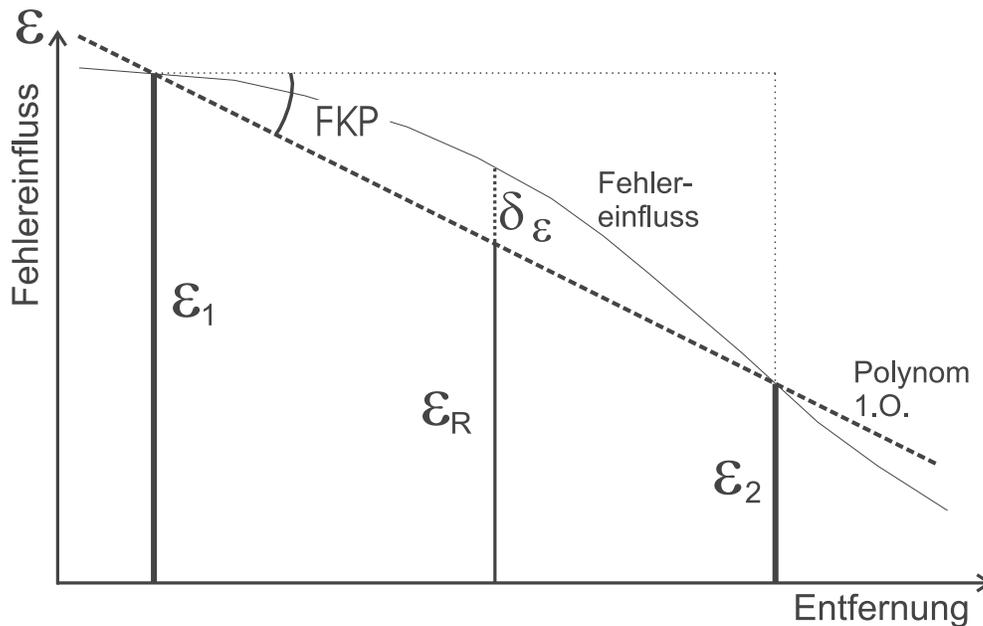


Abbildung 4.3: Lineare Modellierung der FKP für zwei Referenzstationen mit Fehlerbetrachtung nach [Wübbena 1998].

gemacht werden. Dies bedingt einen erhöhten Aufwand bei der Kommunikation und einen hohen Rechenaufwand auf der Roverstation. Eine Umsetzung dieses Verfahrens auch für kinematische Messungen in Echtzeit ist zur Zeit nicht bekannt.

4.3.2 Flächenkorrekturparameter (FKP)

Flächenkorrekturparameter (FKP) ([Wübbena et al. 1996], [Wübbena 1998]) modellieren die entfernungsabhängigen Fehleranteile über eine flächenhaft polynomiale Parametrisierung für jeden Satelliten. Zur Erklärung mag dienen, dass im Referenzstationsnetz für jede Sensorstation die entfernungsabhängigen Fehleranteile berechnet werden und über Polynom Anpassungen in das Messgebiet übertragen werden. Die Ordnung des Polynoms wird über die zeitliche und räumliche Variabilität des Einflusses und den Abstand der Sensorstationen gewählt. Bei ausreichend geringen Stationsabständen bzw. geringer räumlicher Variabilität ist entsprechend der gewünschten Genauigkeit ein Polynom 1. Ordnung ausreichend. In Abbildung 4.3 ist eine derartige Modellierung mit zwei Referenzstationen über ein lineares Polynom dargestellt.

Auf der Referenzstation 1 wird der Fehlereinfluss ϵ_1 ermittelt, entsprechend auf Station 2 ϵ_2 . Für die Interpolation mit einem Polynom 1. Ordnung wird eine Gerade entlang der Basis und die FKP in Abhängigkeit der Entfernung gerechnet. Mit Hilfe einer Näherung der Nutzerposition (z.B. durch eine absolute Einzelstationslösung) wird aus dem FKP-Polynom die einzelne Korrektur ϵ_R abgeleitet. Die Abweichung von der wahren Nutzerposition ergibt auch bei starken Gradienten nur einen geringen Anteil am Modellierungsfehler δ_ϵ , zum Beispiel bei einer Abweichung von 50 m mit Gradienten von 20 ppm lediglich 1 mm. Um den Modellierungsfehler δ_ϵ möglichst klein zu halten, muss der Sensorabstand optimiert werden.

Eine Berechnung aus nur zwei Referenzstationen ist nicht geraten, da hiermit nur die Fehlermodellierung längs der Basislinie ermöglicht wird. Abbildung 4.4 zeigt vereinfacht eine Modellierung über drei Stationen.

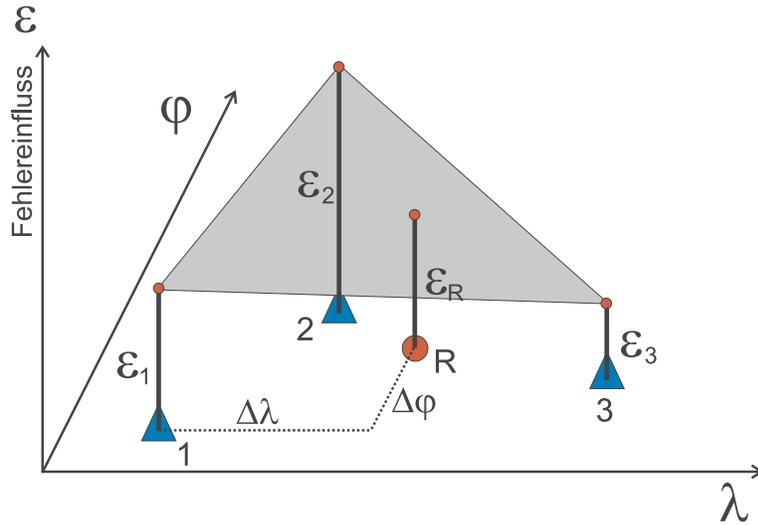


Abbildung 4.4: Lineare Modellierung der FKP für drei Referenzstationen.

Die Modellierung der FKP, wie sie in dieser Arbeit verwendet werden, erfolgt in der GNRT-Software mit einem linearen Flächenpolynom je mit einem geometrischen (L_0 -FKP) und einem ionosphärischen Parameter (L_I -FKP) in Ost-West und Nord-Süd Richtung. Bei der Vernetzung des SAPOS-Dienstes werden zur Berechnung der ortsabhängigen Fehler aus den FKP für jeden Satelliten die Formeln 4.10 und 4.11 verwendet.

$$\delta r_0 = 6.37 \cdot (N_0 \cdot (\Phi - \Phi_r) + E_0 \cdot (\lambda - \lambda_r) \cdot \cos \Phi_r) \quad (4.10)$$

$$\delta r_I = 6.37 \cdot H \cdot (N_I \cdot (\Phi - \Phi_r) + E_I \cdot (\lambda - \lambda_r) \cdot \cos \Phi_r) \quad (4.11)$$

mit

6.37	Approximation für den Erdradius in [10^6 m]
δr_0	entfernungsabhängiger Fehler für das geometrische Signal in [m]
δr_I	entfernungsabhängiger Fehler für das ionosphärische Signal in [m]
N_0, E_0	FKP in Nord-Süd (N) und Ost-West (E) Richtung für das geometrische Signal in [ppm]
N_I, E_I	FKP in Nord-Süd und Ost-West Richtung für das ionosphärische Signal in [ppm]
Φ_r, λ_r	geographische Koordinaten der Referenzstation in [rad]
H	Hilfsgröße $H = 1 + 16 \cdot (0.53 - E/\pi)^3$ mit
E	Elevation des Satelliten in [rad].

Die Umrechnung der δr_0 und δr_I in Korrekturwerte für die Trägerphasenmessungen auf L_1 (δr_1) und auf L_2 (δr_2) erfolgt durch die Formeln 4.12 und 4.13.

$$\delta r_1 = \delta r_0 + (120/154) \cdot \delta r_I \quad (4.12)$$

$$\delta r_2 = \delta r_0 + (154/120) \cdot \delta r_I \quad (4.13)$$

Das AdV-Plenum *Satellitenpositionierungsdienst SAPOS -Standards, Vernetzung, Einheitlichkeit* hat auf einer Sondertagung am 28. November 2001 in Fulda beschlossen, die Vernetzung mit FKP einheitlich bis zum 31. Dezember 2002 einzuführen [AdV 2001]. Das VRS-Verfahren kann optional angewendet werden.

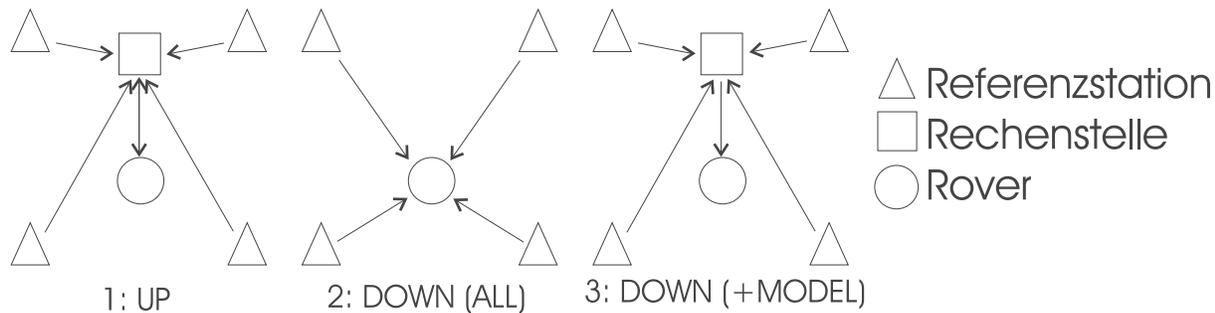


Abbildung 4.5: Konzepte zur Realisierung von Multistationslösungen in Echtzeit.

4.3.3 Datenfluss-Konzepte für Multistationslösungen in Echtzeit

Die Messdaten (Rohdaten, präprozessierte Daten und ggf. Modellparameter) der Referenz- und der Roverstationen müssen für die Auswertung des Netzes und der Positionslösungen kombiniert werden. Es sind verschiedene Realisierungen für den Datenfluss einer Multistationslösung in Echtzeit denkbar, wobei Aspekte der Datenübertragung, des Hardware-Einsatzes und der Auswertung der Daten eine wesentliche Rolle spielen. Die hauptsächlichen Merkmale sind in der Tabelle 4.1 zusammengefasst und in der Abbildung 4.5 schematisch dargestellt.

Konzept 1: *Upload* der Nutzerdaten an eine Rechenstelle

Die Nutzerdaten werden zu einer zentralen Rechenstelle gesendet (*upload*) und dort mit den Referenzstationsdaten kombiniert. Die Lösung kann ggf. wieder an den Nutzer gesendet werden. Auf der Rechenstelle müssen über unidirektionale Verbindungen möglichst permanent die Daten mehrerer Referenzstationen gesammelt werden. Es entsteht ein hoher Rechenaufwand an der zentralen Rechenstelle, der ansteigt, wenn mehrere Rover das System nutzen. Im Sinne einer schnellen Verarbeitung wird die Bereitstellung mehrerer Rechner und Datenübertragungskanäle an der Rechenstelle notwendig. Die Übertragung der Messdaten an die Rechenstelle bzw. der Ergebnisse an den Nutzer erfordert zwingend eine bidirektionale Verbindung zwischen Rover und Rechenstelle, die individuell für jeden Nutzer verfügbar sein muss. Vorteilhaft ist der geringe Rechenaufwand seitens des Nutzers. Wird die Positionsinformation nur an der zentralen Rechenstelle benötigt, muss sie nicht mehr an den Rover gesendet werden. Nachteilig wirkt sich der hohe Aufwand an Rechnern und Übertragungskanälen bei mehreren möglichen Nutzern seitens der zentralen Rechenstelle und eine auf die Möglichkeiten der Rechenstelle reduzierte Bandbreite bei der Nutzung der GPS-Daten aus. Herkömmliche Funkverbindungen außerhalb des Mobilfunks sind somit kaum denkbar.

Konzept 2: *Download* sämtlicher Referenzstationsdaten zum Rover

Der Rover empfängt die Daten aller von ihm benötigten Referenzstationen und wertet sie mit den Roverdaten vor Ort aus. Hierfür müssen seitens des Rover unidirektionale Datenverbindungen zu allen betreffenden Stationen verfügbar sein. Der Rechenaufwand bei dem Nutzer umfasst sowohl die Referenzstationsauswertung als auch die Positionsbestimmung des Rover und ist entsprechend hoch. Nachteilig wirkt sich der hohe Rechenaufwand und die umfangreiche Ausstattung mit Funkempfängern auf Seiten des Rover aus. Der Nutzer kann andererseits die Verarbeitung der Daten individuell vornehmen und speziell auf seine Wünsche ausrichten. Eine Verbindung der Stationen untereinander ist nicht zwingend erforderlich.

Konzept	Rechenaufwand		Richtung der Datenverbindung	
	Rover	Ref/Rech	Rover \leftrightarrow Ref/Rech	Rech \leftrightarrow Ref
1: up	sehr gering	sehr hoch	1 x bi	n x uni
2: down (all)	sehr hoch	sehr gering	n x uni	-
3: down (+model)	gering	hoch	1 x uni	n x uni (bi)

Tabelle 4.1: Konzepte zur Realisierung von Multistationslösungen in Echtzeit. Ref: Referenzstationen, Rech: Rechenstellen, n: Anzahl benötigter Referenzstationen.

Konzept 3: Vorverarbeitung der Daten des Referenzstationsnetzes und *download* zum Rover

Zunächst werden in Echtzeit die Daten des Referenzstationsnetzes vorverarbeitet, um eine geeignete Modellierung der Fehlerzustände zu erhalten. Von den Referenzstationen müssen zumindest unidirektionale Datenverbindungen zu einer zentralen Rechenstelle bestehen, auf der die Modelle berechnet werden. Der Hardwareaufwand ist von der Anzahl der Referenzstationen abhängig. Die Modellparameter werden dem Nutzer gesendet und von diesem zur Positionsberechnung herangezogen. Auf der Roverstation muss die Anbringung der Modellparameter auf die übersendeten Daten abgestimmt sein. Es wird mindestens eine unidirektionale Verbindung zur Rechenstelle benötigt.

Für die Aussendung der Daten an die Nutzer können auch die Übertragungskanäle der Referenzstationen genutzt werden. Dazu muss jedoch die Verbindung zur Rechenstelle bzw. zu den anderen Referenzstationen bidirektional gestaltet werden. Diese Lösung ist im Grunde eine Erweiterung des Konzeptes 3.

Für marine Anwendungen werden die Positionen in den meisten Fällen auf dem Messschiff benötigt. Ein großer Hardwareaufwand an Bord ist aus praktischen Gründen zu vermeiden, ebenfalls ein hoher Rechenaufwand, da die Daten üblicherweise zusätzlich mit weiteren Sensoren verknüpft werden müssen. Datenverbindungen zwischen den Referenzstationen sind einfacher aufrecht zu erhalten als Datenverbindungen zwischen einem bewegten Rover und einer Vielzahl von Referenzstationen. Deshalb ist dem dritten Konzept ein Vorrang zu geben. Für Anwendungen, bei dem die Position nicht am Ort ihres Entstehens benötigt wird, ist auch das erste Konzept denkbar.

Kapitel 5

Untersuchungen zur Reduzierung entfernungsabhängiger Fehleranteile

Die Anwendung der hochpräzisen GPS-Positionsbestimmung in Echtzeit erforderte die Entwicklung neuer Suchalgorithmen zur Bestimmung der Mehrdeutigkeiten, die automatisiert, schnell und sicher ohne ein spezielles Messverfahren (z.B. Antennentausch, *antenna swap*) die Messungen initialisieren (*On-The-Fly*, OTF). Um die Leistungsfähigkeit derartiger Algorithmen abschätzen zu können, wurden am Institut für Erdmessung frühzeitig Untersuchungen zur Schnelligkeit, Sicherheit und Genauigkeit von Mehrdeutigkeitsbestimmungen in kinematischen Anwendungen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Mehrdeutigkeitsbestimmung durch die Verwendung von mehreren Referenzstationen bei längeren Entfernungen zwischen Rover und Referenzstation sicherer und schneller wird.

Im Folgenden werden auch ältere Datensätze zur Untersuchung herangezogen, um einen möglichst vollständigen Eindruck über die Möglichkeiten der GPS-Positionsbestimmung auch unter kaum von der Ionosphäre, jedoch von SA beeinflussten Daten zu erhalten und mit den Gegebenheiten in den Jahren 2001 und 2002 (ohne SA, jedoch mit ionosphärischen Störungen) vergleichen zu können. SA soll laut einer politischen Entscheidung [Clinton 2000] nicht mehr aktiviert werden. Trotzdem ist eine Untersuchung nicht nur der Vollständigkeit halber sinnvoll, sondern auch, weil vergleichbare Effekte auch in Zukunft in GNSS Systemen eine Rolle spielen können.

5.1 Voruntersuchungen zur präzisen GPS Positionsbestimmung

In den Voruntersuchungen wird die Leistungsfähigkeit von OTF-Algorithmen auf kurzen Entfernungen, der Einsatz von zwei Referenzstationen für eine Profilfahrt über 60 km und die Nutzung von temporären Referenzstationen für ein Messgebiet mit maximal etwa 25 km Distanz zur Referenzstation anhand realer Daten untersucht. Die Messungen fanden zu Zeitpunkten statt, in denen kaum ionosphärische Störungen, aber SA-Einflüsse auf die GPS-Messungen wirken.

Untersuchung der OTF-Algorithmen

Als Beispiel für küstennahe Anwendungen mit Entfernungen ≤ 4 km zur Referenzstation werden Daten aus den Jahren 1993 bis 1994 untersucht. Leistungsfähige Echtzeitsysteme zur hochpräzisen Positionsbestimmung waren damals in der Entwicklung. Unter anderem wurden zwei Messfahrten des Peilschiffes *Nynorderoog* des *Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie (NLÖ)*, Forschungsstelle Küste, im Wattengebiet vor Norderney begleitet. An Bord wurden geodäti-

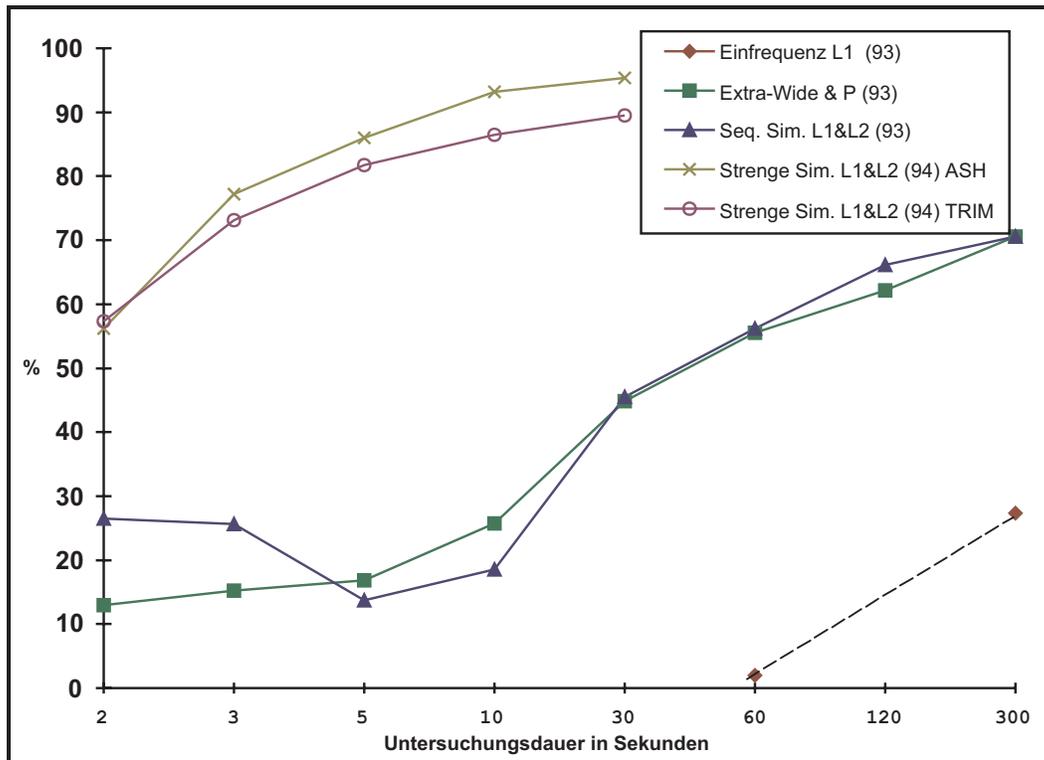


Abbildung 5.1: Erfolgsquoten unterschiedlicher Algorithmen bei der Mehrdeutigkeitsbestimmung mit GEONAP im Postprocessing.

sche Zweifrequenzempfänger der Typen *Ashtech Z12* (Datensätze 1993 und 1994) und *Trimble 4000SSE* (Datensatz 1994) montiert. Als Referenzstation wurde jeweils an Land ein *Ashtech Z12* Empfänger betrieben. Die Untersuchungen wurden im Postprocessing mit dem GPS-Auswertesystem GEONAP durchgeführt.

Datensätze von etwa 2 h Länge werden in Zeitsegmente von 2 s bis zu 5 min Dauer eingeteilt. Diese Segmente werden unabhängig voneinander mit den folgenden Mehrdeutigkeitsuchalgorithmen bearbeitet:

- Einfrequenzauswertung für den Datensatz der Messfahrt von 1993. Dabei werden nur die Beobachtungen auf L_1 zur Auswertung herangezogen.
- Extra-widelaning für den Datensatz der Messfahrt von 1993. Zunächst werden die Mehrdeutigkeiten der Linearkombination L_W (Widelane) mit Hilfe der Code/Trägerphasenkombination gelöst, danach die des ionosphärischen Signals L_I . Alle nachfolgenden weiteren Auswertungen sinnvoller Linearkombinationen haben eine effektive Wellenlänge von 1.72 m. Die Vergrößerung der effektiven Wellenlänge vereinfacht die Lösung der Mehrdeutigkeiten.
- Sequentielle simultane Zweifrequenzauswertung für den Datensatz der Messfahrt von 1993. Die sequentielle simultane Zweifrequenzauswertung ist eine Vorstufe der streng simultanen Zweifrequenzauswertung, die nachfolgend beschrieben wird.
- Streng simultane Zweifrequenzauswertung für die Datensätze der Messfahrt von 1994 (*Ashtech* und *Trimble*). Die Mehrdeutigkeiten der Beobachtungen beider Messfrequenzen L_1 und L_2 werden in einer gemeinsamen Ausgleichung bestimmt. Die effektive Wellenlänge zur Lösung der Mehrdeutigkeiten beträgt wie beim Extra-widelaning 1.72 m.

Erfolgsquote in 5 s-Segmenten	mit meistens 8-9 Satelliten	mit meistens 6-7 Satelliten	mit meistens 5 Satelliten
<i>Trimble</i>	94.3 %	73.1 %	45.0 %
<i>Ashtech</i>	100 %	78.5 %	43.8 %

Tabelle 5.1: Erfolgsquoten bei der Lösung von Mehrdeutigkeiten mit 5 s-Segmenten mit der Simultanen Zweifrequenzauswertung mit GEONAP im Postprocessing.

In Abbildung 5.1 ist die relative Anzahl korrekt gelöster Mehrdeutigkeiten (Erfolgsquote) in den beschriebenen Untersuchungen grafisch dargestellt. Erste korrekte Mehrdeutigkeitenlösungen werden bei der Einfrequenzauswertung erst ab 1 min, nach 5 min bei 30% der Segmente gelöst. Die Ergebnisse des Extra-widelaning und der sequentiellen Zweifrequenzauswertung sind in etwa gleich, bereits nach 30 s sind etwa 45% der Fälle korrekt gelöst, nach 5 min über 70%. Die Weiterentwicklung zur strengen simultanen Zweifrequenzauswertung zeigt bereits bei einer Segmentdauer von nur 3 s eine Erfolgsquote von über 70%, ansteigend auf etwa 90% nach 30 s.

Die Abhängigkeit der Schnelligkeit der Mehrdeutigkeitenlösungen von der Anzahl der beobachteten Satelliten zeigt beispielhaft die Tabelle 5.1, in der die Erfolgsquote bei einer Segmentdauer von 5 s für die *Trimble* und *Ashtech*-Datensätze von 1994 dargestellt wird. Mit zumeist 8 bis 9 sichtbaren Satelliten werden im Mittel 97% der Fälle korrekt gelöst, mit 6 bis 7 Satelliten immerhin noch 75% und bei 5 Satelliten etwa 44%.

Die Unterschiede in den Untersuchungen in der Abbildung 5.1 und der Tabelle 5.1 zwischen den Empfängertypen *Ashtech* und *Trimble* lassen keinen Schluss auf die Leistungsfähigkeit der Empfänger zu, da die Roverantennen an verschiedenen Standpunkten an Bord der *Nymorderoog* angebracht waren und somit verschiedene partielle Abschattungen durch Schiffsaufbauten auftraten.

Die Verwendung der streng simultanen Zweifrequenzauswertung zeigt wesentliche Verbesserungen gegenüber den Einfrequenzlösungen und dem Extra-Widelaning hinsichtlich des Einsatzes in einem Echtzeitprogrammssystem.

Einsatz von zwei Referenzstationen auf einer Profilfahrt

Ab 1995 wurden die Untersuchungen auf größere Entfernungen ausgeweitet, um die Möglichkeiten auch in küstenfernen Gewässern beziehungsweise mit Nutzung eines permanenten Referenzstationsnetzes abschätzen zu können. Auf einer Messfahrt mit dem Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungs-Schiff *VWFS WEGA* des *Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie* (BSH, Hamburg) im April 1995 wurden an Bord und auf einer Referenzstation auf Helgoland geodätische Zweifrequenzempfänger vom Typ *Ashtech Z12* betrieben. Weiterhin wurde die Referenzstation Cuxhaven der LGN verwendet, die mit einem geodätischen Zweifrequenzempfänger *Trimble 4000 SSE* ausgestattet ist. Die Fahrt verlief auf direktem Wege zwischen Cuxhaven und Helgoland in Entfernungen von jeweils 2 km bis 60 km zu den Referenzstationen.

Die Erfolgsquoten im mittleren Drittel der Fahrt für die Simultane Zweifrequenzauswertung mit GEONAP sind für die Segmentdauern von 10 s, 1 min, 2 min und 5 min sowohl nur mit Nutzung der Referenzstation Cuxhaven als auch zusätzlich mit der Station Helgoland in Abbildung 5.2 dargestellt. Das Schiff ist hier 20 km bis 40 km von den Stationen entfernt. Nur mit der Station Cuxhaven als Referenz sind mit 10 s-Segmenten in etwa 30% der Fälle die Mehrdeutigkeiten korrekt gelöst worden. Unter Hinzunahme der Referenzstation Helgoland liegt die Erfolgsquote bei 62%. Mit Daten von beiden Referenzstationen wurden mit 5 min-Segmenten in allen Fällen die Mehrdeutigkeiten korrekt gelöst, mit einer Referenzstation beträgt die Erfolgsquote 85%.

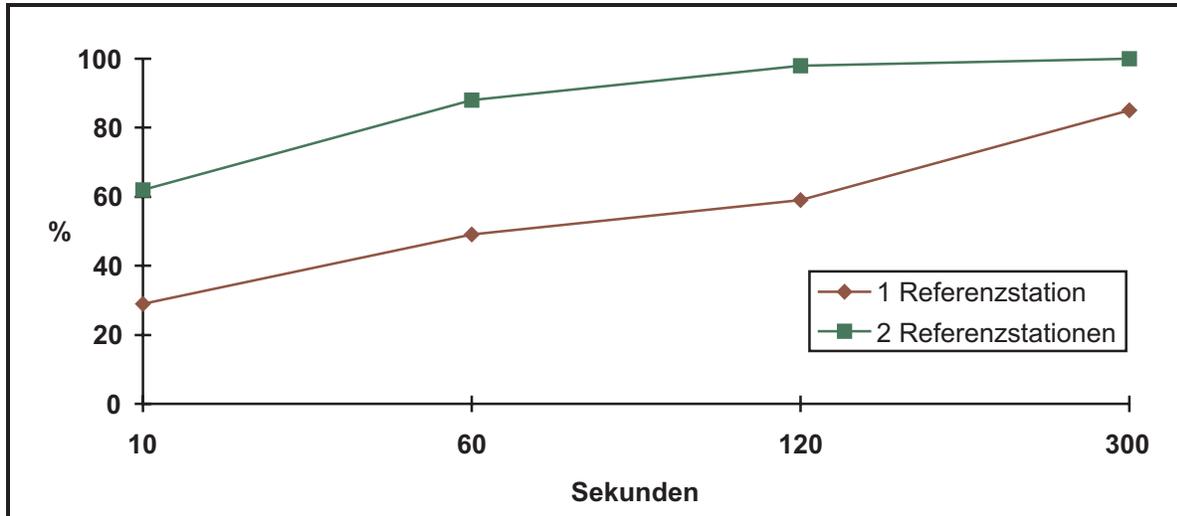


Abbildung 5.2: Erfolgsquoten mit der Simultanen Zweifrequenzauswertung bei der Mehrdeutigkeitsbestimmung mit GEONAP (Postprocessing). Fahrt mit dem *VWFS WEGA* in Entfernungen von 20 km bis 40 km zur Referenzstation Cuxhaven bzw. Helgoland.

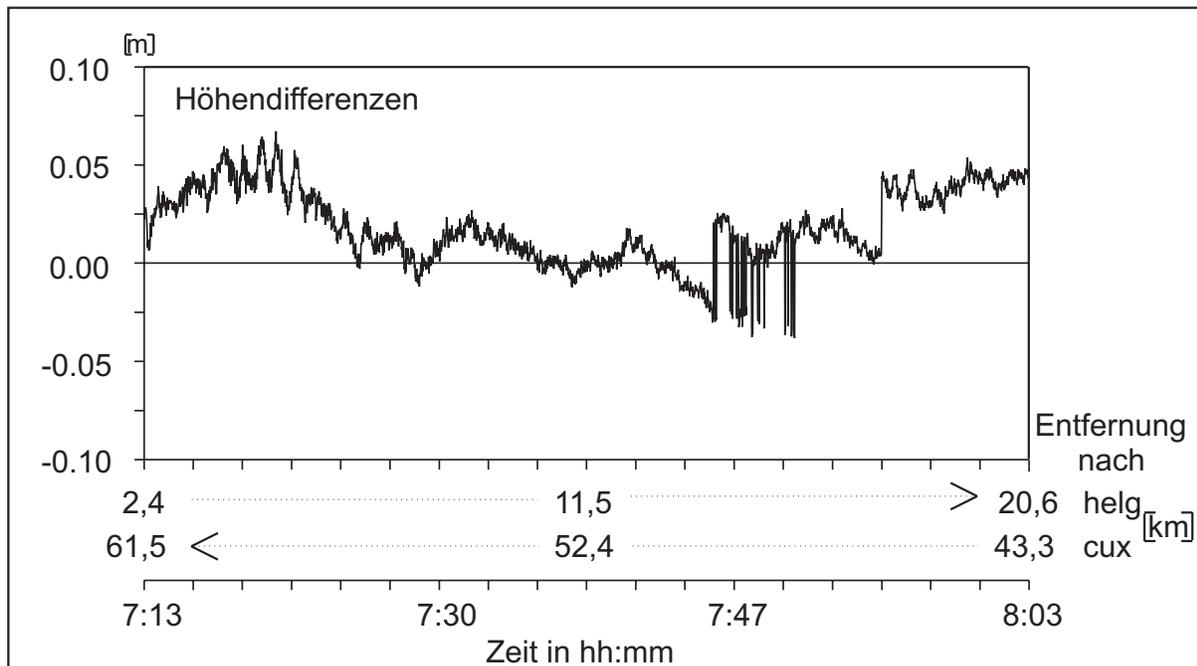


Abbildung 5.3: Differenzen der Höhen zweier GPS-Lösungen über verschiedene Referenzstationen. Fahrt mit dem *VWFS WEGA* in Entfernungen von 2 km bis 21 km zur Referenzstation Helgoland bzw. von 62 km bis 43 km von Helgoland.

Zur Abschätzung des Genauigkeitspotentials der GPS-Lösungen wurde die Trajektorie der GPS-Schiffsantenne mit jeder Referenzstation einmal unabhängig bestimmt und miteinander verglichen. Die erste Lösung wurde mit der Referenzstation Helgoland berechnet, wobei sich das Schiff bis auf etwa 20 km von der dortigen Referenzstation fortbewegte. Die zweite Lösung wurde mit der Referenzstation Cuxhaven prozessiert, die im Verlauf der Messfahrt 40 km bis 60 km vom Schiff entfernt ist. In Abbildung 5.3 ist die Höhendifferenz zwischen den Einzellösungen aufgetragen. Die Differenzen betragen zwischen +6 cm und -3 cm. Die von GEONAP angegebenen Standardabweichungen für die Höhen variieren für die Helgoland-Lösung um 3 cm bis 5 cm, die der Cuxhaven-Lösung um 7 cm bis 11 cm.

Die Untersuchung zeigt, dass die Mehrdeutigkeitsbestimmung durch die Einbeziehung weiterer Referenzstationen wesentlich verbessert werden kann. Vorteilhaft für das Ergebnis wirkte sich der relativ gradlinige Profilverlauf zwischen den zwei Referenzstationen aus, der im Meeresbereich üblicherweise nicht gegeben ist. Für andere Anwendungen muss ein Netz von Referenzstationen genutzt werden, um ähnliche Ergebnisse zu gewinnen.

Einsatz temporärer Referenzstationen und Modellierung von Bahnfehlern zur Reduzierung entfernungsabhängiger Fehleranteile

In Zusammenarbeit mit dem damaligen Stadtvermessungsamt Hamburg, jetzt *Amt für Geoinformation und Vermessung*, wurden 1996 in Echtzeit Koordinatenbestimmungen von 25 gleichmäßig verteilten Punkten in Entfernungen bis zu 25 km von der permanenten Referenzstation in Hamburg durchgeführt. Zusätzlich wurden drei weitere temporäre Stationen betrieben. Ziel der Untersuchungen war es, eine Vernetzung mit insgesamt vier Referenzstationen im Postprocessing zu simulieren und die Ergebnisse mit den in Echtzeit gewonnenen Ergebnissen zu vergleichen. Die Ergebnisse wurden in [Wübbena et al. 1996] veröffentlicht.

Die Messungen in Echtzeit wurden auf der Referenzstation mit der Software GNREF, auf der Mobilstation mit GNRT (siehe Kapitel 3.4.2) und die Auswertungen im Postprocessing mit GEONAP ausgeführt. Für jeden Punkt sind vier Festsetzungen (*fixing*) der Mehrdeutigkeiten durch vorher künstlich erzwungene Zurücksetzung (*reset*) derselben vorgenommen worden. Pro Fixing wurden die Positionen 5 min aufgezeichnet und gemittelt. Neben der Koordinatenbestimmung wurde auch die Dauer gemessen, die benötigt wird, um die Mehrdeutigkeiten festzusetzen (engl.: *time-to-fix-ambiguity*, TTFA). Die Messungen wurden mit Empfängern vom Typ *Ashtech Z12* vorgenommen. Die Korrekturdaten der Referenzstation wurden über 2-m-Funk übertragen. Parallel dazu wurden die Beobachtungsdaten auf allen Stationen aufgezeichnet (RINEX).

Mit den RINEX-Daten werden im Postprocessing zunächst die Echtzeitmessung nachgestellt. Für die Zeitpunkte der Festsetzungen werden Zeitfenster mit GEONAP ausgewertet und die Koordinatendifferenzen zu den Sollpositionen berechnet. In der Vernetzungssimulation werden die Messungen zu den drei temporären Referenzstationen genutzt, um zusätzliche breiten- und längenabhängige Driftparameter für die Modellierung der Satellitenbahnen einzuführen (siehe Abbildung 5.4). Die Restfehler auf den Referenzstationen werden als zusätzliche Bahnfehler modelliert und fließen in die Positionsbestimmung der Rover ein. Die Driften betragen für die Pseudostreckenmessungen bis zu 2.5 ppm, meistens jedoch unter 1 ppm.

Zur besseren Veranschaulichung der Ergebnisse werden lineare Regressionen über die Differenzen zwischen Soll- und Ist-Koordinaten und über die TTFA-Werte gerechnet und in der Abbildung 5.5 zusammengefasst. Aufgrund der unterschiedlichen lokalen Empfangsbedingungen von Satelliten- und Korrekturdaten streuen vor allem die TTFA-Werte stark, so dass die Parameter der Regressionen nicht signifikant im Sinne der Ausgleichsrechnung sind, jedoch Tendenzen aufzeigen. Die TTFA steigt somit von etwa 1 min bei nahen Entfernungen von unter 5 km bis hin zu etwa

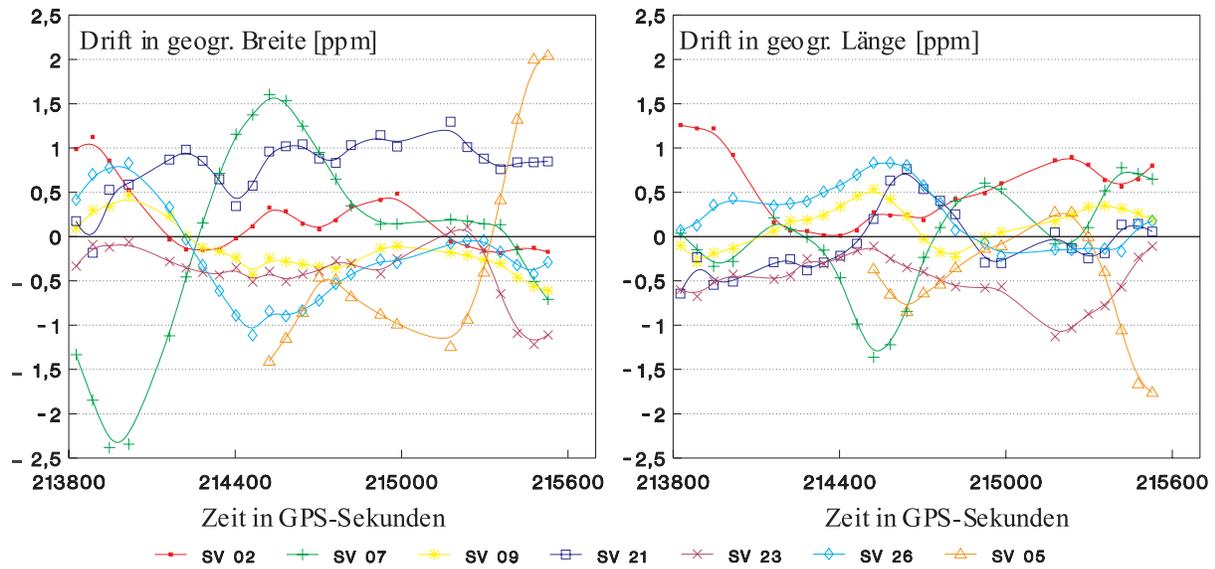


Abbildung 5.4: Modellierte Driftparameter der Satellitenbahnen bei Vernetzungssimulation. Messungen bei relativ ungestörter Ionosphäre in Hamburg [Wübbena et al. 1996].

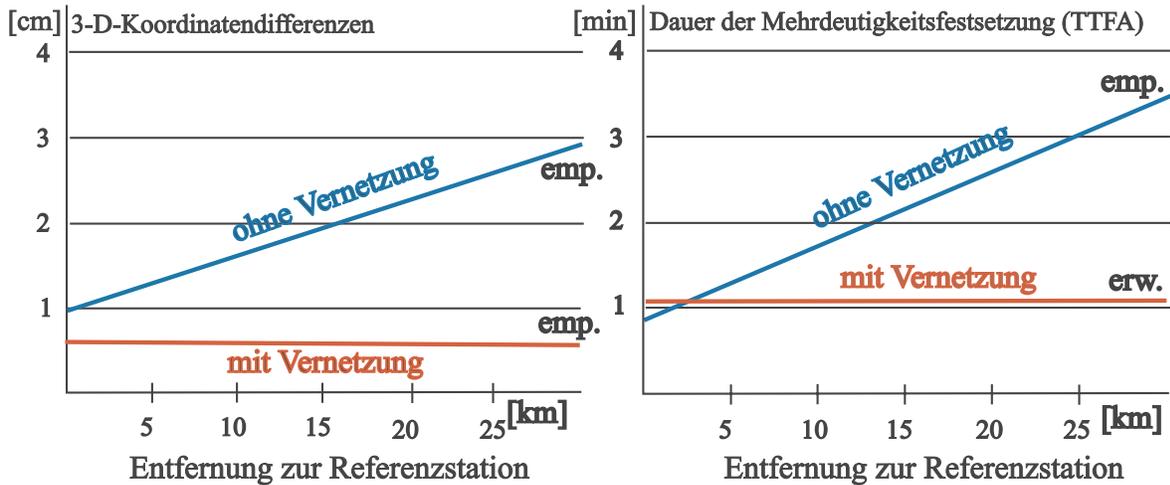


Abbildung 5.5: Vergleich der Ergebnisse einer Echtzeitvermessung ohne Vernetzung in Hamburg mit einer Vernetzungssimulation. Messungen bei relativ ungestörter Ionosphäre in Hamburg. emp.: empirisch ermittelt, erw.: erwartet.

3 min bei Entfernungen von 25 km zur Referenzstation ohne die Verwendung der Driftparameter der Vernetzungssimulation. Die Standardabweichungen der Koordinaten zeigen ein ähnliches Verhalten mit etwa 1 cm bei Distanzen unter 5 km bis hin zu 2.5 cm auf 25 km. Auf den größeren Entfernungen kann somit ein Einfluss von etwa $1 \text{ cm} \pm 0.6 \text{ ppm}$ auf die Koordinatenbestimmung nachgewiesen werden. Bei Berechnung der Vernetzungssimulation ergeben sich keinerlei entfernungsabhängige Fehleranteile. Aus der linearen Regression ergibt sich ein leicht negativer Trend. Die Standardabweichungen aus den Koordinatendifferenzen betragen etwa 0.6 cm. Die TTFA-Werte für die Vernetzungssimulationen können nicht ermittelt werden, der entsprechend dargestellte Graph in Abbildung 5.5 beruht auf der Annahme, dass sich der TTFA-Wert auf langen Entfernungen ähnlich verhält wie auf kurzen Entfernungen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass unter SA-Einfluss und in Zeiten mit ungestörten ionosphärischen Bedingungen mit Hilfe eines Referenzstationsnetzes entfernungsabhängige Fehleranteile bereits durch die Modellierung zusätzlicher Bahnparameter deutlich reduziert werden.

5.2 Vernetzung von Referenzstationen unter SA-Einfluss

Die Umsetzung der Vernetzung in Echtzeit wird in einem Testnetz in Südniedersachsen von der LGN (Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen) getestet. Die nachfolgenden Untersuchungen geben einen Eindruck über die Leistungsfähigkeit der Vernetzung im Testnetz Südniedersachsen zu einem Zeitpunkt, in dem der endgültige Netzausbau (Anzahl, Ausstattung und teilweise Lage der Stationen) noch nicht abgeschlossen war. Eine Kalibrierung der Antennenphasenvariationen wurde im Netz nicht vorgenommen. Die damalige Netzkonfiguration bestand aus Referenzpunkten in Hannover, Braunschweig und Clausthal. Die Vernetzung lief nicht operationell, aufgrund verschiedener ungünstiger Stationseigenschaften war die Lösung der Mehrdeutigkeiten im Referenzstationsnetz zeitweise nicht möglich. Die Darstellung der Untersuchungen in dieser Arbeit gibt einen Einblick in die Einsetzbarkeit des GPS mit SA, jedoch ohne starke ionosphärische Störungen.

Der Aufbau des Netzes entspricht dem in dem Kapitel 4.3.3 beschriebenen Konzept 3. Die Daten des Referenzstationsnetzes werden auf einer zentralen Rechenstelle vorverarbeitet und die Ergebnisse per Funk an den Nutzer übertragen. An der Referenzstation Hannover ist die Rechenstelle für die Vernetzung eingerichtet. Die Stationen Clausthal und Braunschweig senden permanent RTCM 2.1-Daten über 2-m-Funk aus, die auf dem Mehrzweckgebäude (MZG) der Universität Hannover empfangen werden. Über eine Telefonleitung werden die Daten an die LGN in Hannover zur gemeinsamen Prozessierung mit der dortigen Station weitergeleitet. Die Auswertung umfasst die Mehrdeutigkeitslösung und die Berechnung der FKP. Die Beobachtungen der Referenzstation Hannover werden zusammen mit den FKP in das RTCM-Format gewandelt und über Telefonleitung an die 2-m-Funksendeeinrichtung auf dem MZG übertragen. Die exponierte Lage des Daches des MZG ermöglicht gute Empfangseigenschaften im Umland von Hannover.

Für die Untersuchungen wurde auf einem Fahrzeug eine *Ashtech* GPS-Antenne montiert und eine Fahrt im Bereich von Ottbergen durchgeführt. Ottbergen liegt zentral in dem Referenzstationsdreieck und hat zu den Stationen etwa eine Entfernung von 30 km bis 40 km. Auf einem Festpunkt wurde ein lokaler Referenzpunkt mit einem *Ashtech* Z12 Empfänger und einer geodätischen L1/L2-Antenne vom Typ *Geodetic II* installiert. Im Postprocessing wird mit der Station über kurze Entfernungen von bis zu einem Kilometer eine Solllösung für die abgefahrte Trajektorie berechnet. Tabelle 5.2 gibt einen Überblick über die Stationen, deren Ausstattung und die jeweilige Entfernung zum Messgebiet des mobilen Empfängers.

Punkt	Ort	Distanz	ellips. Höhe	Empfänger/Antenne
0649	Braunschweig	33.2 km	132 m	<i>Trimble</i> 4000 SSI/14532.0
0640	Hannover	33.4 km	120 m	<i>Trimble</i> 4000 SSI/14532.0
0651	Clausthal	43.4 km	651 m	<i>Trimble</i> 4000 SSI/14532.0
ottb	Ottbergen	1-2 km		<i>Ashtech</i> Z12/700228D
rove	Rover	-		<i>Ashtech</i> Z12/700700B

Tabelle 5.2: Übersicht über Ausstattung der Referenzstationen und Entfernung zum Messgebiet Ottbergen. Testnetz Südniedersachsen.

Ansatz	TTFA	Stabw. Breite	Stabw. Länge	Stabw. Höhe	=> 3-D	ppm
ohne Vernetzung	85 s	39 mm	25 mm	66 mm	81 mm	2.4
mit Vernetzung	30 s	6 mm	6 mm	16 mm	18 mm	0.5

Tabelle 5.3: Vergleich zwischen unvernetzten und vernetzten Echtzeitlösungen unter SA-Einfluss. Entfernung zur Referenzstation Hannover: etwa 33 km. Kinematische Messung im Testnetz Südniedersachsen.

Die Daten des Rovers werden in Echtzeit simultan sowohl mit als auch ohne Vernetzungsparameter ausgewertet. Um die Schnelligkeit der Lösungen der Mehrdeutigkeiten testen zu können, werden diese 10 s nach Berechnung verworfen und eine Neuberechnung erzwungen. Die Zeitbereiche mit gelösten Mehrdeutigkeiten werden über einen Test detektiert: als Grenzwert für die Testentscheidung zur Festsetzung wird die von der Software zur Positionsbestimmung berechneten Standardabweichung 0.02 m festgesetzt. Alle nicht festgesetzten Epochen weisen üblicherweise deutlich höhere Standardabweichungen von einigen Dezimetern auf.

Die TTFA-Werte und Abweichungen in allen Koordinatenkomponenten zwischen der Solllösung und den Zeiten mit gelösten Mehrdeutigkeiten sind in Abbildung 5.6 und der Tabelle 5.3 zusammengefasst. Der mittlere TTFA-Wert liegt für die unvernetzte Lösung mit 14 Festsetzungen bei 85 s. Im Mittel wurden die Mehrdeutigkeiten mit dem vernetzten Ansatz mit 29 Festsetzungen in 30 s gelöst. Der Vergleich der Standardabweichungen berechnet aus den Koordinatendifferenzen zu der Solllösung ergibt für die unvernetzte Lösung mittlere Abweichungen von 0.081 m (entsprechend 2.4 ppm) und für die Lösung mit Nutzung der FKP aus der Vernetzung 0.018 m (0.5 ppm). Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Vernetzung der Referenzstationen unter SA-Bedingungen deutliche Verbesserungen erbringt. In der Untersuchung wird die eingangs der Arbeit geforderte Genauigkeit von 3 cm voll erreicht. Mit einem mittleren TTFA-Wert von einer halben Minute ist eine hochpräzise Position schnell verfügbar.

Abbildung 5.7 zeigt die im Postprocessing für den ganzen Tageslauf berechneten FKP. Die Skalen der Grafiken weisen unterschiedliche Maßstäbe für die FKP Komponenten der ionosphärenfreien L_0 Linearkombination (FKP- L_0) und des ionosphärischen Signals der L_I Linearkombination (FKP- L_I) auf, um später eine bessere Vergleichbarkeit mit der Abbildung 5.10 zu ermöglichen. Die FKP- L_I zeigen besonders in der Ost-West-Komponente einen ruhigen Verlauf ohne nennenswerte Störungen. In Ost-West-Richtung überschreiten die Werte kaum 2 ppm. In Nord-Süd-Richtung erreichen sie Werte bis zu 4 ppm, meist sind sie jedoch auch hier kleiner als 2 ppm. Die FKP- L_I korrelieren hier im geringen Maße mit dem Tageslauf der Sonne (wahrer Aufgang: 07:07 MEZ, entsprechend etwa GPS-Sekunde 194800; Untergang 17:57 MEZ, entsprechend etwa GPS-Sekunde 233800). Kurz vor bis kurz nach Sonnenaufgang und zur Kulmination der Sonne (etwa GPS-Sekunde 214300) sind Störungen im ansonsten ruhigen Verlauf zu erkennen.

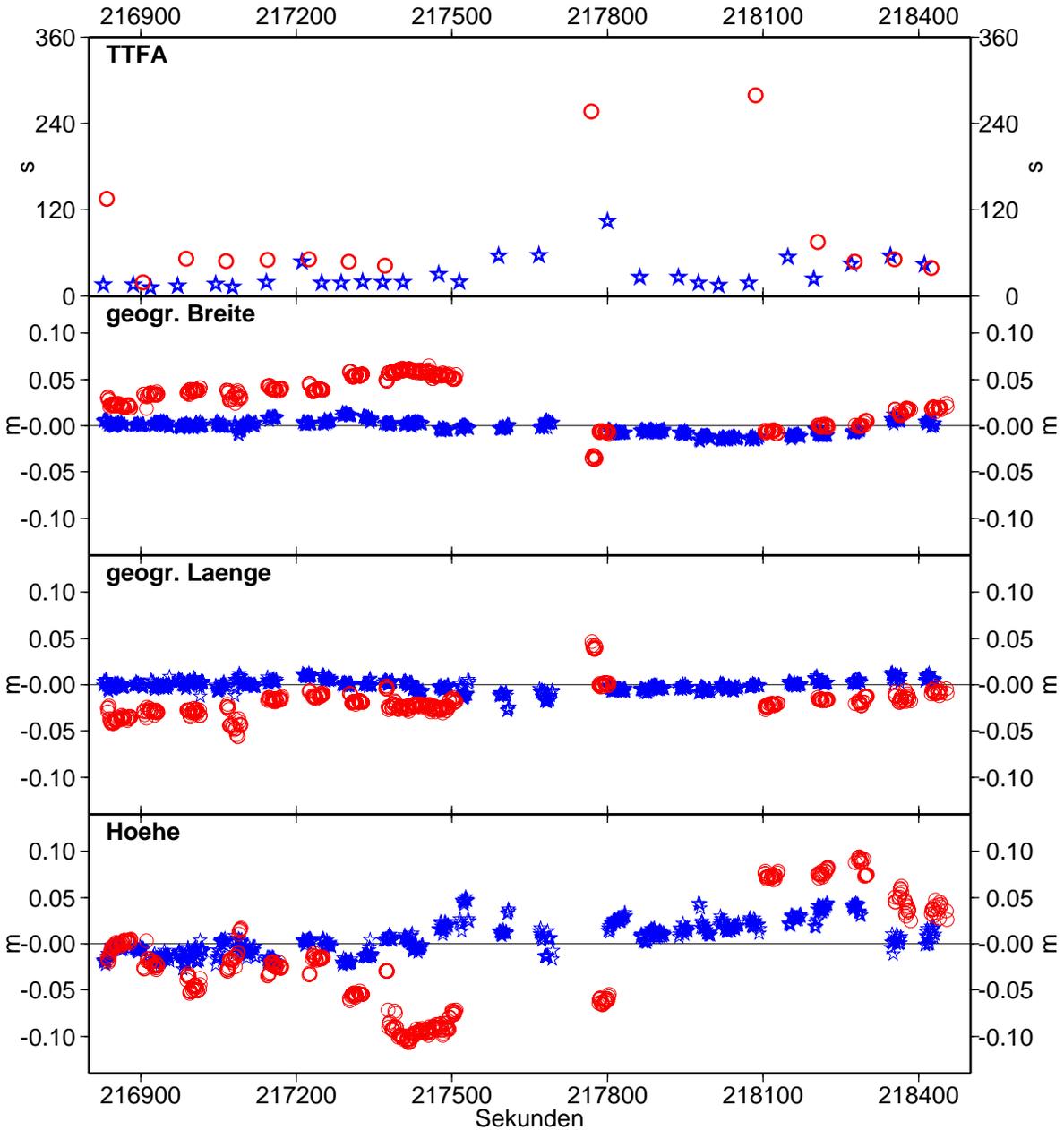


Abbildung 5.6: Vergleich zwischen unvernetzten (Kreise) und vernetzten (Sterne) Echtzeitlösungen unter SA-Einfluss (Auszug). Entfernung zur Referenzstation Hannover: etwa 33 km. Kinetische Messung im Testnetz Südniedersachsen.

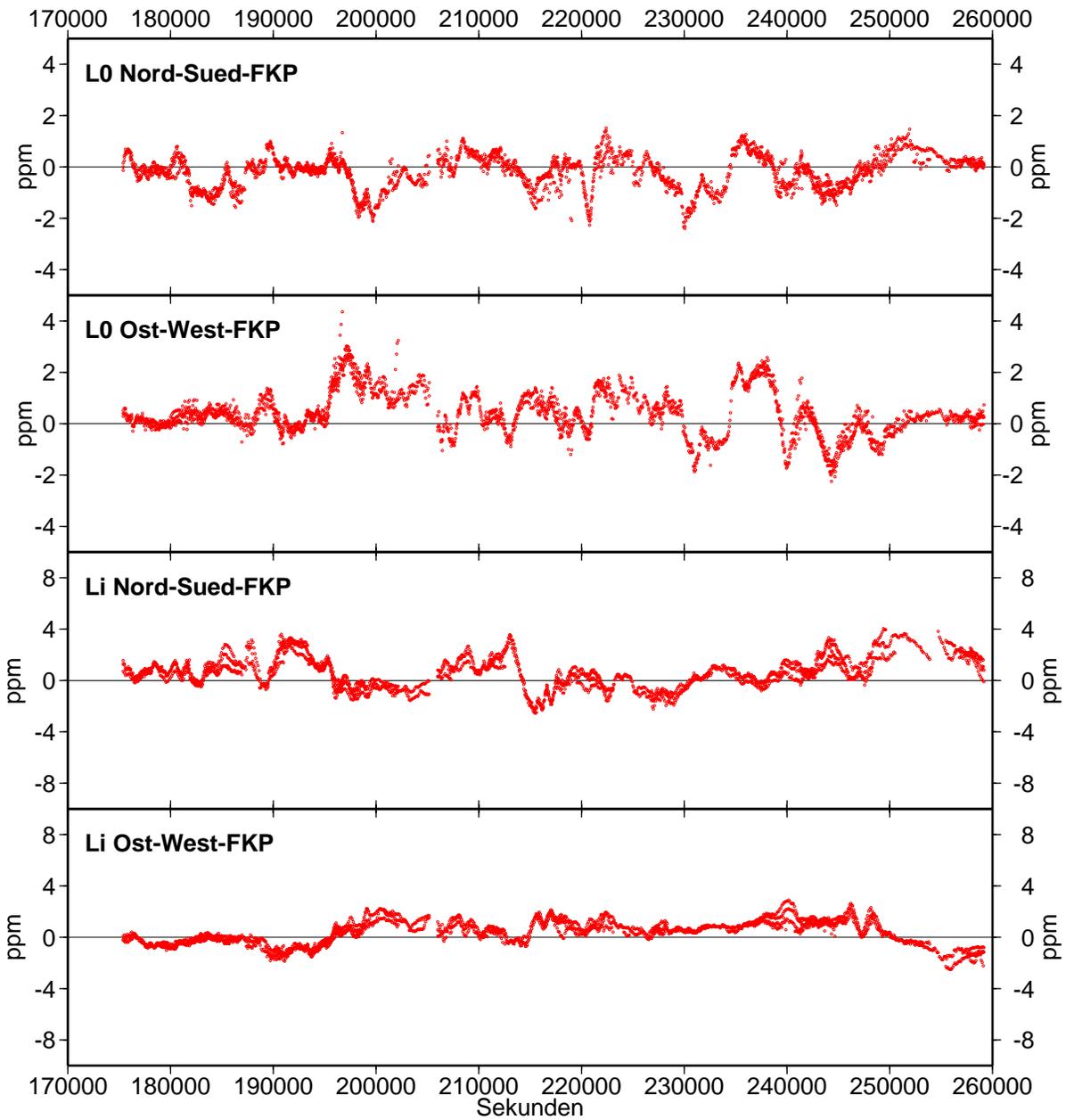


Abbildung 5.7: Darstellung der FKP aus den Untersuchungen unter SA-Einfluss.

Die "geometrischen" FKP der ionosphärenfreien L_0 Linearkombination (FKP- L_0) zeigen in Nord-Süd-Richtung ebenfalls nur Werte kleiner als 2 ppm, während in Ost-West-Richtung Werte bis zu 3 ppm erreicht werden. Nach Sonnenaufgang beginnen die FKP- L_0 stärker zu variieren. Die Vermutung liegt nahe, dass dies auf Veränderungen in der Troposphäre hinweist, die durch die Einstrahlungen der Sonne bedingt sind. Ebenfalls sind stärkere Effekte nach Sonnenuntergang zu entdecken, die durch die Abkühlung der Troposphäre verursacht sein können. Ansatzweise sind demnach sowohl in den ionosphärischen FKP als auch in den geometrischen FKP die physikalisch zu erwartenden Effekte zu erkennen. Eine genauere Analyse kann hier nicht vorgenommen werden, da die Daten zusätzlich mit stationsabhängigen Fehleranteilen behaftet sind, die unmodelliert in die Berechnung der FKP einfließen.

Die Ergebnisse wurden zu einem Zeitpunkt gewonnen, in dem die Sonnenfleckenanzahl langsam anstieg, aber noch keine übermäßig starken ionosphärischen Störungen in unseren Breiten zu beobachten waren.

5.3 Vernetzung von Referenzstationen während des Sonnenzyklus 23

In den Jahren 2000 bis 2002 nahmen die ionosphärischen Aktivitäten stark zu, so dass auch in bestehenden Referenzstationsnetzen Probleme mit der Mehrdeutigkeitsfestsetzung auftraten. Im Folgenden wird untersucht, welche Genauigkeiten mit und ohne Vernetzung erreicht werden können. Grundlage der Untersuchung sind Daten aus dem Referenzstationsnetz der LGN Niedersachsen vom 06.02.2002. Der Ausbau des Referenzstationsnetzes der LGN ist formal im Jahre 2001 abgeschlossen worden. Die für die Untersuchung genutzten Referenzstationen sind so gewählt, dass ein Netz an der deutschen Nordseeküste mitsamt Helgoland simuliert werden kann. In dem Kapitel 5.4 wird ein solches Netz diskutiert. In der linken unteren Ecke der Abbildung 5.8 ist die verwendete Netzkonfiguration auf die Küstenlinie der Deutschen Bucht projiziert worden. Das Netz an der Nordsee wird durch die Küstenlinie und die vorgelagerten Inseln vorgegeben. In der Simulation mit realen Daten wird das Abbild des Nordseenetzes um etwa 90° nach Westen gekippt, um eine vergleichbare Verteilung der Referenzstationen zu erreichen. Eine Aufstellung der Stationen ist in der Tabelle 5.4 gegeben, eine Übersicht über die Lage ist der Abbildung 5.8 zu entnehmen.

Als Rover werden Stationen des SAPOS-Netzes gewählt, die innerhalb oder außerhalb der beschriebenen Masche liegen. Im übertragenen Sinne überdecken die Rover die für hochpräzise Vermessungen interessanten Messgebiete der Deutschen Bucht zwischen Helgoland und der Küste. Die Punkte 0642, 0668, 0681, 0657 und 0652 liegen außerhalb des Referenzstationsnetzes. An diesen Stationen wird untersucht, ob die Modellierung des Fehlerhaushaltes durch die FKP auch für diese Gebiete Verbesserungen für die Positionsbestimmung bringt.

Die Auswertung erfolgt im Postprocessing mit dem Programmpaket GNRT/GNNET. Die Stationen werden für die Untersuchungen als quasi-kinematische Rover mit einer a priori angenommenen Dynamik von 5 m/s eingeführt. Für jeden Rover wird vom nächstgelegenen Punkt des Referenzstationsnetzes sowohl mit als auch ohne Nutzung der FKP Mehrdeutigkeits- und Positionslösungen gerechnet. Nach erfolgter Lösung werden für den Rover automatisch Resets der Mehrdeutigkeitslösungen durchgeführt. Die Positionslösungen nach erfolgter Festsetzung (*fixing*) der Mehrdeutigkeitslösungen werden mit der Referenzkoordinate verglichen und auf Richtigkeit überprüft.

Als Grenzwert für die Einstufung in korrekte oder falsche Mehrdeutigkeitslösungen wird mit einem konstantem Anteil (0.03 m) plus einem entfernungsabhängigen Anteil gerechnet. Der ent-

Referenzstationen						
Punkt	Ort	ell. Höhe	Empfänger/Antenne	<i>im Nordseenetz</i>		
0659	Cloppenburg	99 m	Trimble 4700/33429.20+GP	Sylt		
0656	Oldenburg	69 m	Trimble 4700/33429.20+GP	Niebüll		
0655	Rotenburg	82 m	Trimble 4700/33429.20+GP	Büsum		
0680	Buchholz	153 m	Trimble 4700/33429.20+GP	Stade		
0653	Hohenbünstorf	152 m	Trimble 4700/29659.00 SNOW	Bremerhaven		
0678	Hankensbüttel	136 m	Trimble 4700/33429.20+GP	Wilhelmshaven		
0676	Celle	106 m	Trimble 4700/33429.20+GP	Carolinensiel		
0663	Hildesheim	218 m	Trimble 4700/33429.20+GP	Norderney		
0651	Clausthal	651 m	Trimble 4700/33429.20+GP	Borkum		
0666	Nienburg	87 m	Trimble 4700/33429.20+GP	Helgoland		
Roverstationen						
Punkt	Ort	ell. Höhe	Empfänger/Antenne	Referenz	Distanz	
0642	Osnabrück	150 m	Trimble 4700/29659.00 TCWD	0659	66.1 km	
0668	Damme	121 m	Trimble 4700/33429.20+GP	0659	37.8 km	
0675	Wildeshausen	74 m	Trimble 4700/33429.20+GP	0659	27.7 km	
0654	Sulingen	112 m	Trimble 4700/33429.20+GP	0666	27.1 km	
0677	Verden	92 m	Trimble 4700/33429.20+GP	0666	30.1 km	
0665	Schwarmstedt	85 m	Trimble 4700/33429.20+GP	0666	27.9 km	
0661	Soltau	118 m	Trimble 4700/33429.20+GP	0680	38.7 km	
0640	Hannover	124 m	Trimble 4700/33429.20+GP	0663	29.6 km	
0652	Alfeld	150 m	Trimble 4700/33429.20+GP	0663	19.3 km	
0657	Hameln	141 m	Trimble 4700/33429.20+GP	0663	38.3 km	
0681	Holzminden	158 m	Trimble 4700/33429.20+GP	0663	56.8 km	

Tabelle 5.4: Übersicht über die Ausstattung der Referenz- und Roverstationen und der Lage in einem simulierten Nordseenetz.

fernungsabhängige Anteil wird für die Lösungen ohne Nutzung der FKP mit 15 ppm bzw. 3 ppm der Entfernung zur jeweiligen Referenzstation bei Nutzung der FKP gewählt, entsprechend den zu erwartenden, maximal möglichen Auswirkungen des Fehlerhaushalts auf die Positionsbestimmung. Der Grenzwert approximiert einen 3σ -Wert unter der Annahme, dass die Koordinatenabweichungen ohne FKP etwa 5 ppm und mit FKP etwa 1 ppm betragen.

Die Differenzen der Koordinatenlösungen zum Soll enthalten deterministische Anteile. Insbesondere für den unvernetzten Ansatz sind dies die fehlende Modellierung der entfernungsabhängigen Fehleranteile. Zum Zeitpunkt einer realen Messung sind diese nicht bekannt, so dass die charakteristische Eigenschaft einer deterministischen Zeitfunktion, prinzipiell für jeden Zeitpunkt exakt angebbar zu sein [Pelzer 1980], entfällt. Die Differenzen werden daher im Folgenden als stochastische Zeitfunktion interpretiert, deren Variationsbreite durch die Varianz σ^2 beziehungsweise die Standardabweichung σ angegeben wird. Tabelle 5.5 zeigt die Grenzwerte zur Einstufung der Lösungen und die ermittelten Ergebnisse, die auch in Abbildung 5.9 dargestellt werden. Die kursiv gedruckten Werte in der Tabelle beziehen sich auf die außerhalb des Referenzstationsnetzes liegenden Stationen.

Für alle Stationen gilt, dass die Anzahl der Mehrdeutigkeitsfestsetzungen mit dem Vernetzungsansatz zum Teil um ein Vielfaches höher liegt als bei der Auswertung ohne Anwendung der FKP aus der Vernetzung. Für die kürzeren Entfernungen von 20 km bei den innerhalb der Masche liegenden Punkten steigt die Anzahl richtig gelöster Mehrdeutigkeiten um mehr als 50%, bei 40 km um mehr als 430% (Punkt 0661: ohne FKP 154, mit FKP 823) durch die Nutzung der FKP.

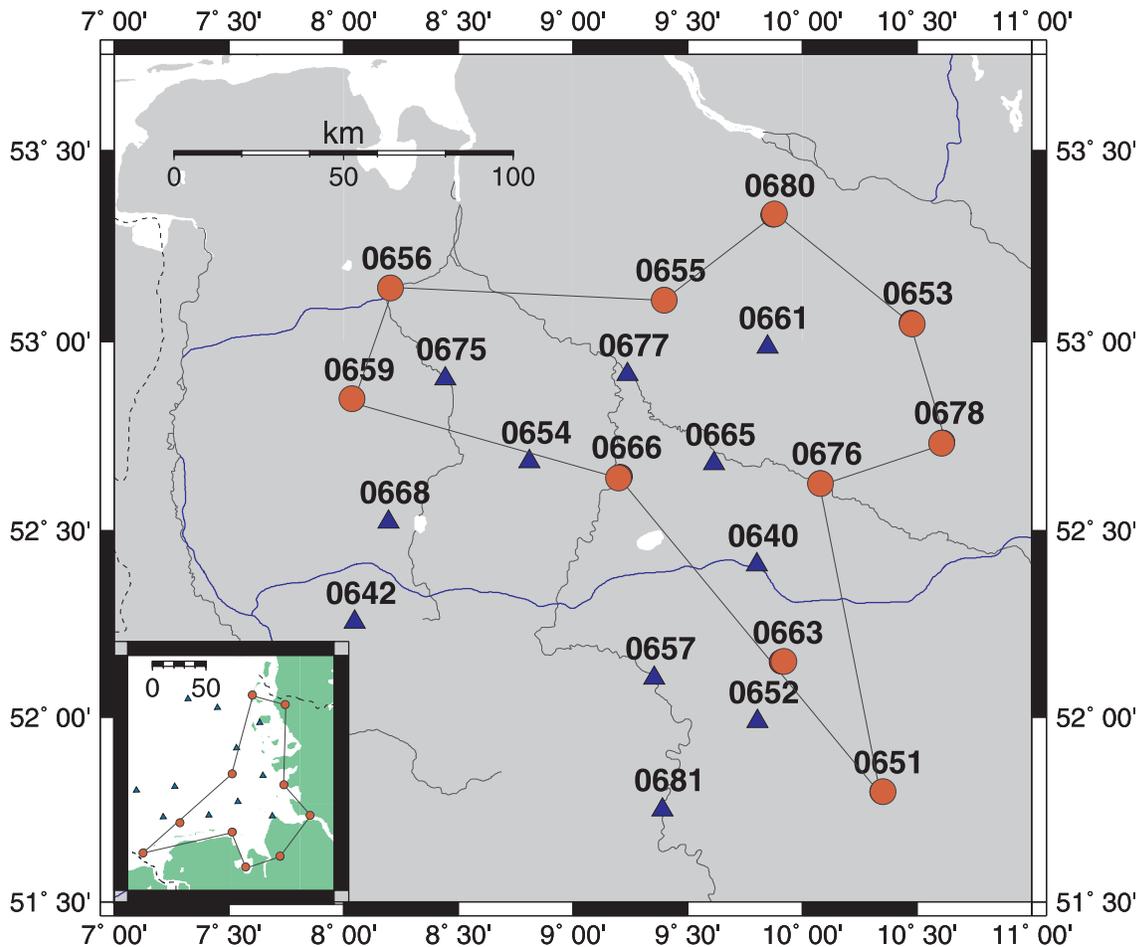


Abbildung 5.8: Übersicht über die Lage der Referenz- (Kreise) und Roverstationen (Dreiecke) im Referenznetz der LGN Niedersachsen. Simulation eines potentiellen Nordseenetzes.

Ohne Vernetzung variiert der prozentuale Anteil falscher Mehrdeutigkeitslösungen zwischen 0.6% und 11.7%, die mittlere Dauer bis zu einer erfolgreichen Mehrdeutigkeitsfestsetzung steigt von etwa 2 min für 19 km bis auf 7 min für 57 km. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung zeigt entfernungsabhängige Anteile von 1.4 ppm bis hin zu 2.9 ppm. Die einzelne, aufgrund der Grenzwerte als richtig eingestufte Mehrdeutigkeitslösung weist eine Standardabweichung der Positionen von etwa 50 cm und somit einen entfernungsabhängigen Anteil von 7.7 ppm auf.

Aus den Untersuchungen ergeben sich die folgenden maßgeblichen Erkenntnisse für die Positionsbestimmung mit Vernetzung innerhalb eines Referenzstationsnetzes:

- die Anzahl der Mehrdeutigkeitslösungen steigt deutlich.
- die Anzahl - somit auch der prozentuale Anteil - der falsch gelösten Mehrdeutigkeiten sinkt (hier: $\leq 1\%$, Ausnahme Station 0675 mit 1.2%).
- die Schnelligkeit der Mehrdeutigkeitslösung verbessert sich (hier: im Mittel etwa 1 min).
- die Genauigkeit der Positionsbestimmung wird verbessert (hier: entfernungsabhängige Resteffekte ≤ 1 ppm, 3-D-Standardabweichungen besser als 3 cm).

Stat.	Dist. [km]	Grenzw. ds [m]	falsche Lös.		richtige Lösung			Standardabweichungen				
			Anz. []	Ant. [%]	Anz. []	Ant. [%]	TTFA [s]	Nord [m]	Ost [m]	Höhe [m]	ds [m]	ppm []
ohne Vernetzung												
0652	19.3	0.320	4	0.6	634	99.4	106	0.013	0.008	0.026	0.030	1.6
0654	27.1	0.436	11	2.7	402	97.3	160	0.033	0.028	0.037	0.057	2.1
0675	27.7	0.446	10	2.1	463	97.9	138	0.021	0.018	0.028	0.040	1.4
0665	27.9	0.448	14	3.0	446	97.0	146	0.017	0.014	0.031	0.038	1.4
0640	29.6	0.474	29	11.7	219	88.3	258	0.048	0.029	0.066	0.087	2.9
0677	30.1	0.482	10	3.6	267	96.4	228	0.031	0.024	0.077	0.086	2.9
0668	37.8	0.597	15	11.3	118	88.7	286	0.048	0.031	0.085	0.102	2.7
0657	38.3	0.604	7	2.9	231	97.1	279	0.035	0.026	0.049	0.065	1.7
0661	38.9	0.614	16	9.4	154	90.6	315	0.049	0.028	0.082	0.100	2.6
0681	56.8	0.882	5	3.5	136	96.5	426	0.049	0.028	0.065	0.086	1.5
0642	66.1	1.022	3	75.0	1	25	680	0.039	0.110	0.494	0.507	7.7
mit Vernetzung												
<i>0652</i>	<i>19.3</i>	<i>0.088</i>	<i>1</i>	<i>0.1</i>	<i>996</i>	<i>99.9</i>	<i>59</i>	<i>0.012</i>	<i>0.007</i>	<i>0.025</i>	<i>0.029</i>	<i>1.5</i>
0654	27.1	0.111	8	1.0	769	99.0	76	0.013	0.008	0.021	0.026	1.0
0675	27.7	0.113	9	1.2	737	98.8	78	0.009	0.008	0.020	0.024	0.9
0665	27.9	0.114	5	0.5	943	99.5	56	0.010	0.006	0.018	0.022	0.7
0640	29.6	0.119	5	0.6	821	99.4	68	0.014	0.008	0.017	0.023	0.8
0677	30.1	0.120	2	0.2	982	99.8	50	0.010	0.006	0.016	0.019	0.6
<i>0668</i>	<i>37.8</i>	<i>0.143</i>	<i>4</i>	<i>0.9</i>	<i>449</i>	<i>99.1</i>	<i>143</i>	<i>0.012</i>	<i>0.007</i>	<i>0.024</i>	<i>0.028</i>	<i>0.7</i>
<i>0657</i>	<i>38.3</i>	<i>0.145</i>	<i>13</i>	<i>4.1</i>	<i>305</i>	<i>95.9</i>	<i>214</i>	<i>0.021</i>	<i>0.010</i>	<i>0.032</i>	<i>0.040</i>	<i>1.0</i>
0661	38.9	0.147	1	0.1	823	99.9	72	0.011	0.007	0.020	0.024	0.6
<i>0681</i>	<i>56.8</i>	<i>0.200</i>	<i>9</i>	<i>5.5</i>	<i>156</i>	<i>94.5</i>	<i>370</i>	<i>0.034</i>	<i>0.038</i>	<i>0.049</i>	<i>0.069</i>	<i>1.2</i>
<i>0642</i>	<i>66.1</i>	<i>0.228</i>	<i>8</i>	<i>4.3</i>	<i>176</i>	<i>95.7</i>	<i>358</i>	<i>0.017</i>	<i>0.012</i>	<i>0.036</i>	<i>0.042</i>	<i>0.6</i>

Tabelle 5.5: Ergebnisse der Untersuchungen zum Zeitpunkt eines Maximums der Sonnenaktivitäten.

Im Wesentlichen treffen die Erkenntnisse auch auf die Roverstationen außerhalb des Referenzstationsnetzes zu. Auf der Station 0668, die 20 km außerhalb des Netzes und 37.8 km entfernt von der Referenzstation liegt, erfüllt lediglich die Schnelligkeit der Lösungen mit etwa 2.5 min nicht den Gegebenheiten innerhalb des Netzes. Ab 30 km außerhalb der Netzmasche steigt die Standardabweichung der 3D-Punktbestimmung bereits auf 4 cm und die Anzahl falsch festgesetzter Mehrdeutigkeiten steigt auf über 4%.

Weit außerhalb des Vernetzungsgebietes (60 km) und weit entfernt von der nächsten Referenzstation (66.1 km) ist auf Station 0642 nur eine richtige Mehrdeutigkeitslösung ohne FKP berechnet worden. Eine erfolgreiche Lösung gelang mit FKP nach durchschnittlich 6 min in 176 Fällen. Aus den Standardabweichungen errechnet sich ein Effekt von 0.6 ppm auf die Koordinatenberechnung mit einer 3-D-Standardabweichung von 4.2 cm.

Aus den Untersuchungen wird abgeleitet, dass die Genauigkeit der Positionsbestimmung und die Schnelligkeit der Mehrdeutigkeitslösung auch außerhalb des Referenzstationsnetzes durch die Vernetzung verbessert wird, sofern die Entfernung zum Netz nicht 30 km übersteigt. Es werden jedoch deutliche Verschlechterungen gegenüber dem ansonsten homogenen Ergebnissen innerhalb des Netzes erkennbar.

Abbildung 5.10 zeigt die FKP der Satelliten für den Untersuchungszeitraum eines Tages. Zur besseren Veranschaulichung wurde die Skalierung der Hochachsen für L_I -FKP und L_0 -FKP unterschiedlich gewählt. Die geometrieabhängigen FKP (L_0 -FKP, ionosphärenfreie Linearkombina-

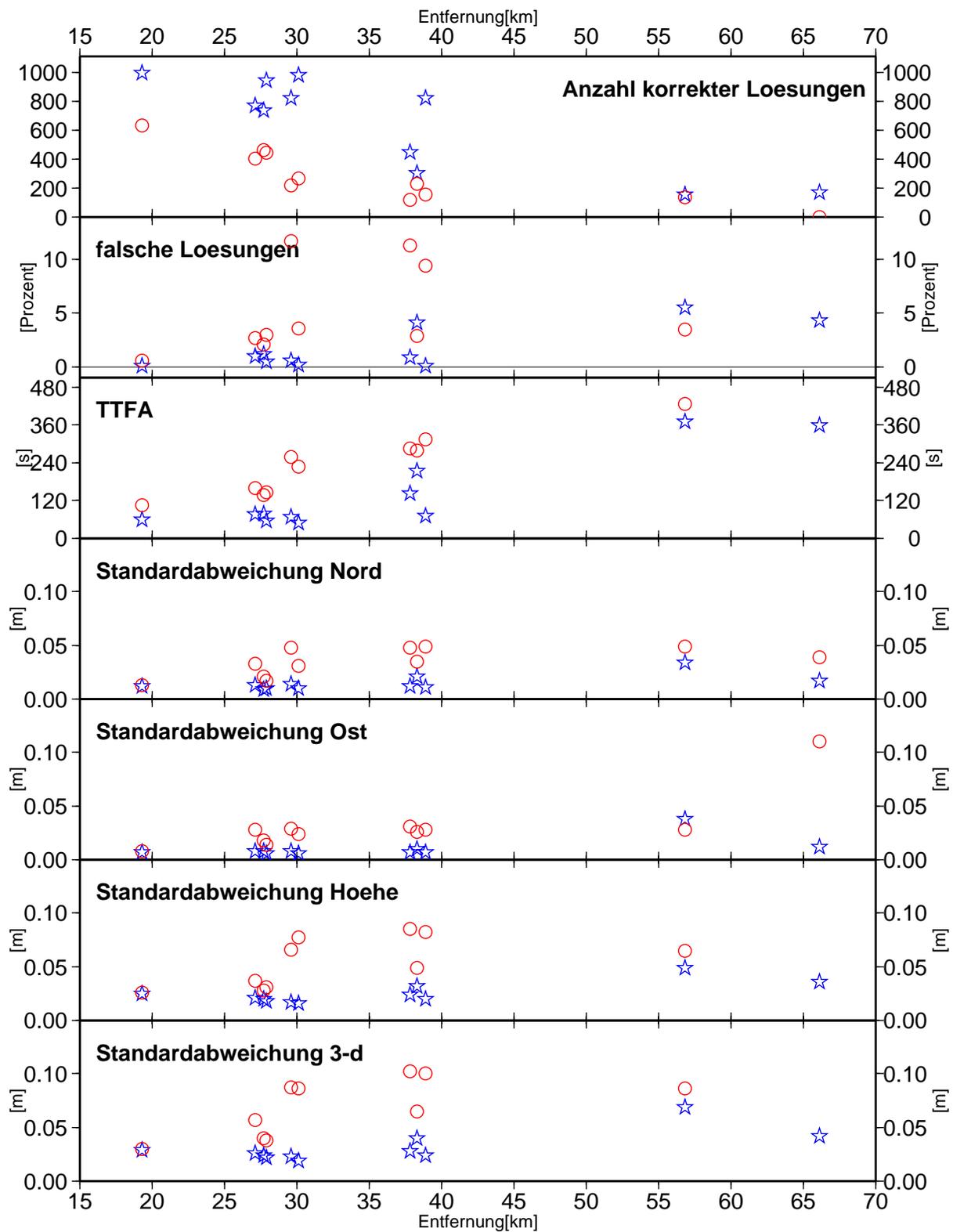


Abbildung 5.9: Darstellung der Ergebnisse zur Vernetzung zum Zeitpunkt eines Maximums der Sonnenaktivitäten. Kreise: ohne Vernetzung; Sterne: mit Vernetzung; gefüllte Sterne: mit Vernetzung außerhalb der Masche.

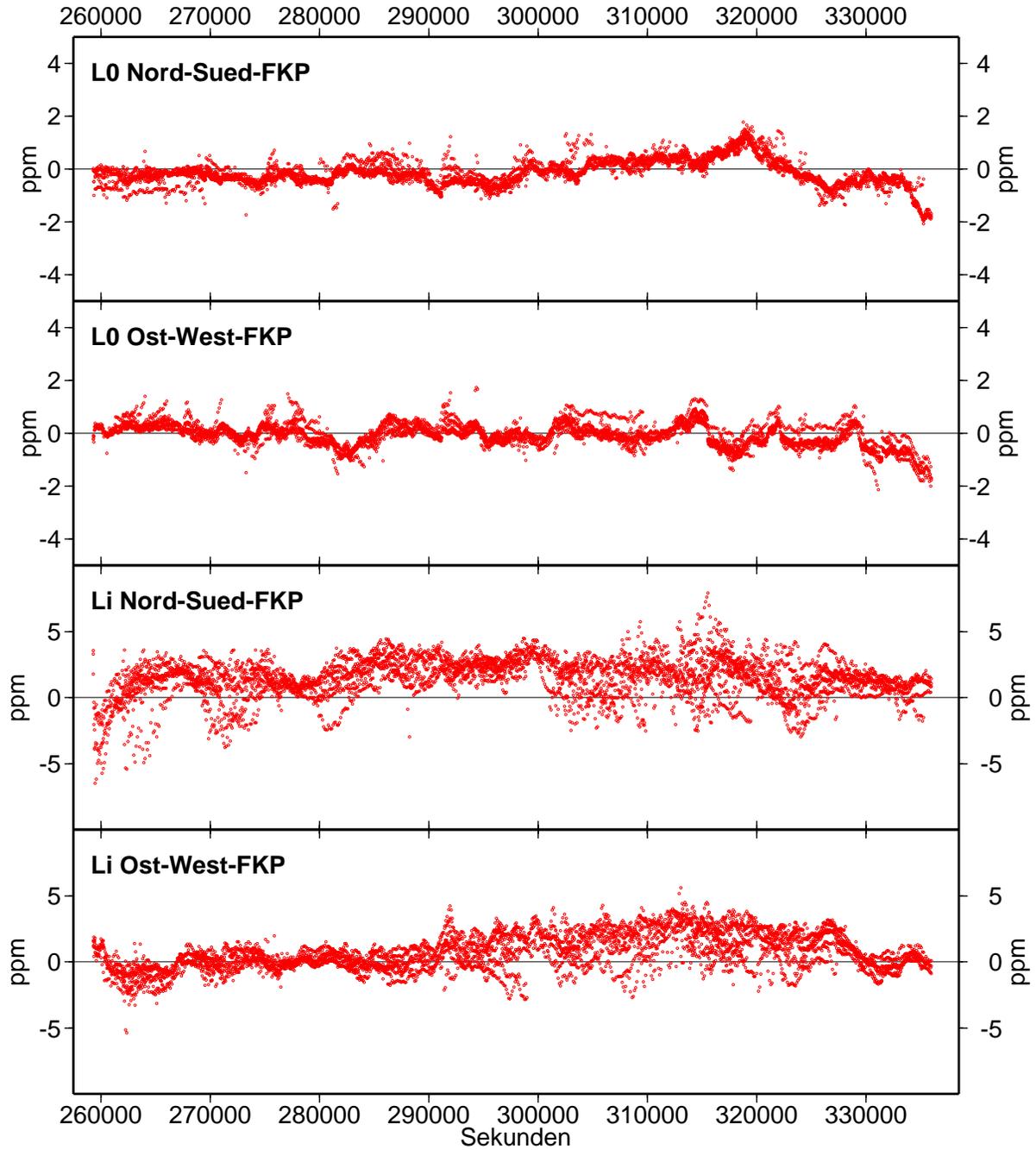


Abbildung 5.10: Darstellung der FKP zur Zeit eines Maximums der Sonnenaktivitäten.

tion) in den oberen Grafiken weisen bei untergehenden Satelliten Gradienten auf, im Allgemeinen überschreiten sie aber nicht 1 ppm. Stärkere Effekte sind in den ionosphärenbedingten FKP (L_I -FKP, Linearkombination des ionosphärischen Signals) in den unteren Grafiken zu erkennen. In Nord-Süd und in Ost-West Richtung erreichen die FKP Größenordnungen von bis zu 5 ppm. Für den dargestellten Tag sind kaum besondere Vorkommnisse in der Ionosphäre beobachtet worden, insgesamt zeigen auch die FKP nur moderate Variationen. In Nord-Süd-Richtung sind gleich zu Beginn der Messung in den ersten Stunden des Tages Variationen zu beobachten. In Ost-West-Richtung setzt eine stärkere Streuung der L_I -FKP erst zum Sonnenaufgang ein (Sonnenaufgang in Hannover am 06.02.2002 um 7:54 Ortszeit, entsprechend GPS-Sekunde 284040), die kontinuierlich ansteigt. Kurz vor Mittag kommt es auch zu größeren Variationen in den L_I -FKP, die ihren Höhepunkt etwa gegen 17 Uhr Ortszeit (Sekunde 316800) erreichen und nach Sonnenuntergang (17:10 Uhr Ortszeit, Sekunde 324600) wieder einen ruhigeren Verlauf aufweisen.

Der augenscheinliche Vergleich der hier dargestellten FKP mit denen, die in der Abbildung 5.7 des Abschnitts 5.2 unter SA-Einfluss (1998) berechnet wurden, ergibt stärkere Variationen der "ionosphärischen" L_I -FKP und schwächere Variationen der "geometrischen" L_0 -FKP im Jahr 2002. Die Ergebnisse des Vergleiches entsprechen somit in erster Näherung den Erwartungen. Der Vergleich der Epochen wird jedoch durch die unterschiedlichen Voraussetzungen durch die Empfänger- und Antennenausstattung auf den Stationen beeinflusst und muss entsprechend vorsichtig bewertet werden.

5.4 Vorschlag zur Vernetzung im Bereich der Nord- und der Ostsee

Für den küstennahen Bereich der Deutschen Bucht und der südlichen Ostsee sind Genauigkeiten im Zentimeterbereich möglichst in Echtzeit von Nutzern als wünschenswert eingestuft worden. In wenigen Jahren werden diese Ziele sicherlich eine weiterreichende Akzeptanz gefunden haben. Für Pegelüberwachungen und wissenschaftliche Fragestellungen (Geodynamik) sind Genauigkeiten im Millimeterbereich von ausgewählten Punkten bei möglichst permanenter Beobachtung erwünscht. Entsprechende Genauigkeiten lassen sich besonders im Küstenbereich schwierig durch einzelne Referenzstationen erreichen. Sollen die Küstenbereiche und vorgelagerte Inseln mit Stationen mit Reichweiten von 5 km ausgerüstet werden (\Rightarrow alle 10 km eine Station), so werden grob abgeschätzt in der Nordsee zur Abdeckung der Wattengebiete 70 Stationen, an der Ostsee 60 Stationen, an der Weser bis Bremen 5, an der Elbe bis Hamburg 6 und am Nord-Ostseekanal 10 Stationen benötigt. Insgesamt sind demnach mindestens 150 Stationen notwendig, die zwar die Küstenlinie, aber nicht entferntere Messgebiete abdecken können. Ein solches Netz aus permanenten Referenzstationen ist unwirtschaftlich, so dass bei einem solchen Vorgehen temporäre Stationen verwendet werden müssen, deren Aufbau jedoch zusätzliches Personal und Arbeitszeit an Land erfordert. Redundante Stationen sind in dieser groben Abschätzung nicht eingerechnet. Eine Vernetzung von Stationen zur Modellierung der Fehlereinflüsse erscheint somit aus wirtschaftlichen Gründen, aber auch zur Abdeckung weiterer Messgebiete bei gesteigerter Leistungsfähigkeit des Referenzstationsnetzes sinnvoll. Im Folgenden werden Vorschläge zur Umsetzung eines solchen Netzes in der Deutschen Bucht und in der südlichen Ostsee gemacht.

Maßgeblich für die Netzplanung ist der mögliche Punktabstand der Referenzstationen, der zum einen durch die gewünschte Genauigkeit und zum anderen durch die Reichweite der Kommunikationslösung begrenzt wird. Desweiteren werden in die Lösung bestehende Stationen des SAPOS-Netzes einbezogen. Derartige Netze zu den damals aktuellen Ausbaustufen des SAPOS-Netzes wurden in [Böder und Seeber 1997] und [Böder und Seeber 1999] vorgestellt.

In den vorhergehenden Abschnitten wurde gezeigt, dass die entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse durch die Vernetzung von Referenzstationen reduziert werden können. Bis etwa 40 km Entfernung sind sichere Mehrdeutigkeitslösungen mit genügend genauen Positionsbestimmungen gegeben. Zu kurzfristigen Zeitpunkten mit besonders starken Störungen der Ionosphäre kann die Verfügbarkeit der Lösung trotzdem noch eingeschränkt sein. Zunächst sind jedoch in den Jahren 2003 bis etwa 2010 geringere ionosphärische Aktivitäten zu erwarten, so dass bei deaktiviertem SA mit Hilfe der Vernetzung wahrscheinlich bessere Ergebnisse als die hier vorgestellten erreicht werden können. Nach 2010 ist wieder mit einem Anstieg der entfernungsabhängigen Fehleranteile zu rechnen.

Die Realisierung der Kommunikationsverbindung spielt bei der Netzplanung eine bedeutende Rolle. Mit der Einrichtung von Richtfunkstrecken unter Nutzung des 2-m-Bandes steht ein sehr preisgünstiges Medium bei hoher Leistungsfähigkeit zur Verfügung. Die Reichweite D für Radiowellen für eine Normalatmosphäre lässt sich vereinfacht nach [Lanigan et al. 1990] aus den Höhen h_1 des Senders und h_2 des Empfängers über der Umgebung wie folgt näherungsweise berechnen:

$$D(km) = 4.12 \cdot (\sqrt{h_1(m)} + \sqrt{h_2(m)}). \quad (5.1)$$

Setzt man für $h_1 = h_2 = 25$ m, so erhält man für die Reichweite etwa $D=41$ km. Diese Höhen sollten prinzipiell bei guter Planung erreicht werden können. Begünstigt durch die Morphologie Helgolands mit dem sich etwa 50 m über das Mittelhochwasser erhebenden Oberland kann hier ein Sender auf etwa 75 m Höhe installiert werden. Entsprechend der obigen Formel und mit einer Empfängerhöhe von wiederum $h_2 = 25$ m ergibt sich eine Reichweite von etwa 56 km.

Somit kommen testweise Entfernungen von etwa 40 km bis 60 km in Betracht. Zusätzlich müssen logistische Gesichtspunkte (Nähe zu einer Stadt oder entsprechender Gebäude) in die Planung einbezogen werden. Eine entsprechende Netzplanung unter Einbeziehung des bestehenden SAPOS-Netzes zum Stand vom Januar 2002 [AdV 2002] zeigt Abbildung 5.11. Bestehende Stationen sind mit hellen Kreisen gekennzeichnet, neu zu installierende Stationen mit grauen Kreisen. Der Radius der Kreise entspricht der Übersicht halber nur 10 km. In Niedersachsen und Hamburg ist ein ausreichend dichtes Netz zur Modellierung des entfernungsabhängigen Fehleranteils gegeben. Durch die günstige Lage von Helgoland ist eine Vernetzung zwischen der Insel und dem Festland generell möglich. In Schleswig-Holstein sind zwei neue Stationen an der Nordsee, eine Station in der Landesmitte und drei zusätzliche Stationen an der Ostseeküste notwendig. Drei Stationen (von denen bereits zwei geplant sind) in Mecklenburg-Vorpommern und zusätzlich drei Stationen in Dänemark und eine Station in Polen lassen eine umfangreiche Vernetzung im deutschen Ostseeraum zu. In den bundesdeutschen Ländern ist die Vernetzung laut AdV-Beschluss [AdV 2001] vom 28.11.2001 bereits geplant. Die Betrachtungen gehen davon aus, dass (AdV)-länderübergreifende Vernetzungsmaßnahmen und die Einbeziehung drei dänischer und einer polnischen Station realisiert werden können.

Das Gebiet südlich von Helgoland zählt weltweit zu den am meisten von der beruflichen Schifffahrt befahrenen Revieren. Nur wenige Kilometer nördlich der ostfriesischen Inseln führen Wirtschaftswege zu den Hafestädten Wilhelmshaven, Bremerhaven und Cuxhaven, aber auch durch die Elbe nach Hamburg bzw. durch den Nord-Ostseekanal zur Ostsee mit Anbindung an die baltischen Länder. In der Nordsee befindet sich im Bereich zwischen dem Festland und den vorgelagerten Inseln das Wattenmeer, das zum größten Teil als schützenswertes Gebiet ausgewiesen und Gegenstand intensiver Forschungen für viele Disziplinen ist. Gleichzeitig dienen die vorgelagerten Inseln als natürlicher Küstenschutz, der kontinuierlich überwacht wird. Bohrinseln und Windkraftanlagen (zukünftig auch Off-shore) sind wichtige energieproduzierende Installationen innerhalb der Vernetzungsmaschen. Entsprechend ist für Vermessungs- und Überwachungsaufgaben ein Nutzerpotential für die Vernetzung zu erwarten.

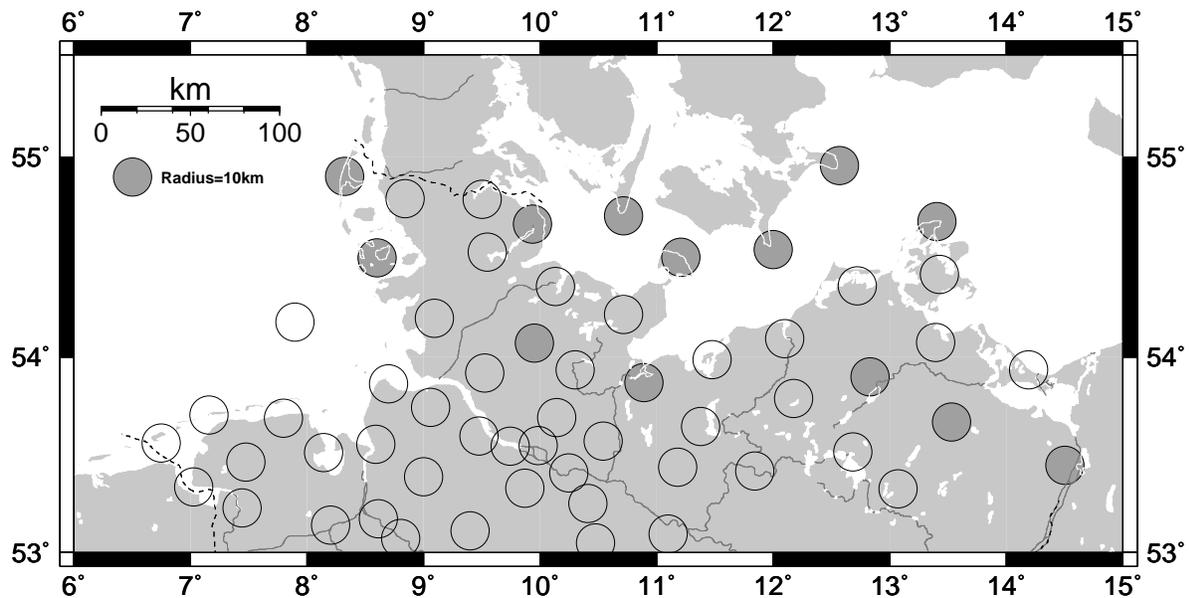


Abbildung 5.11: Mögliche Verteilung von vernetzten Referenzstationen an Nord- und Ostsee. Helle Kreise: bestehende SAPOS-Stationen; graue Kreise: neu zu installierende Stationen.

Für Navigationsanwendungen sind zunächst auf den Wasserstraßen die bestehenden Funkfeuer-DGPS-Verfahren ausreichend. Für Vermessungsaufgaben und Hafenanfahrten ist das vorgestellte Vernetzungskonzept ausreichend. Zu dem deutschen Hoheitsgebiet ist mit dem sogenannten "Entenschnabel" auch Hochseebereich zu zählen. Der "Entenschnabel" erstreckt sich als schmaler werdener Korridor etwa bis zu 300 km in nordöstlicher Richtung von Helgoland aus. Hier sind die hochpräzisen Verfahren mit Zentimetergenauigkeit üblicherweise nicht gefordert. Untersuchenswert ist eine Ausweitung des Verfahrens zur Überwachung von Förderplattformen. Hierfür ist die internationale Zusammenarbeit mit weiteren Nordseeanrainern notwendig. In direkter Folge können Referenzstationsdaten auf diesen Plattformen gewonnen werden. Auch bei unbekanntem Bewegungen der Plattformen können die aus Zweifrequenz-Beobachtungen ableitbaren Informationen der Stützung der Ionosphärenmodellierung in einem Referenzstationsnetz dienen.

Aus einem System an Schwimmbojen im Hochseebereich lassen sich weiterhin die Gezeitenmodelle und Strömungsmodelle präzisieren. Dies wäre ein wesentlicher Beitrag zum Küstenschutz für die Prädiktion von auflaufenden Flutwellen.

Die Realisierung eines derartigen Konzeptes erfordert die enge Zusammenarbeit von Behörden aus dem Vermessungs-, Wasser- und Schifffahrts- und Küstenschutzbereich unter Mitwirkung von universitären Einrichtungen. Dabei sind auch die sonstigen Nord- und Ostseeanrainer zu beteiligen, um gegebenenfalls auch übergeordnete Interessen berücksichtigen zu können.

5.5 Fazit

Entfernungsabhängige Anteile des GPS-Fehlerhaushalts können die Schnelligkeit, Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Positionsbestimmung wesentlich verschlechtern. Das Kapitel behandelt verschiedene Aspekte, die für die hochpräzise Positionsbestimmung in Echtzeit auch über Entfernungen bis zu etwa 50 km relevant sind.

Die Voruntersuchungen zeigen, dass die Wahl des OTF-Algorithmus für die Operationalität des relativen GPS-Messverfahrens von großer Wichtigkeit ist. Moderne leistungsfähige OTF-Algorithmen verwenden Zweifrequenzmessungen für die Mehrdeutigkeitslösungen.

Eine weitere Verbesserung der Schnelligkeit, Sicherheit und Genauigkeit der hochpräzisen Echtzeitpositionsbestimmung wird durch die Verwendung mehrerer Referenzstationen erreicht. Derartige Effekte werden bereits bei langgestreckten, profilhaften Fahrten zwischen zwei Referenzstationen beobachtet. Eine Verdichtung des Referenzstationsnetzes würde die Fehlerwirkung reduzieren, ist jedoch kostenintensiv und unpraktisch. Insbesondere in marinen Anwendungen fehlt es zumeist an Möglichkeiten, Referenzstationen in den Messgebieten auf See zu installieren. Als Lösung bietet sich die Vernetzung von Referenzstationen an.

Bei Versuchen unter SA-Einfluss wurden im Stadtgebiet von Hamburg mehrere Punkte in Echtzeit mit GPS aufgenommen. Entfernungsabhängige Auswirkungen auf die Genauigkeit und die Schnelligkeit der Mehrdeutigkeitslösung wurden festgestellt. Mit der Verwendung temporärer Referenzstationen, die das Messgebiet umschließen, wurden die Daten nachprozessiert und entfernungsabhängige Fehleranteile im Netz als zusätzliche Bahnfehler modelliert. Die Anbringung der Bahnfehler für die Koordinatenbestimmung bewirkt, dass die Punktbestimmung auf einem einheitlichen Genauigkeitsniveau unabhängig von der Entfernung zur Referenzstation erfolgt.

Die Untersuchungen wurden 1998 ebenfalls unter SA-Einfluss auf kinematische Anwendungen in Echtzeit ausgeweitet. In einer "frühen" Vernetzungsmasche der LGN südlich von Hannover wurde die Modellierung der Fehleranteile mit Hilfe von FKP getestet. Die Mehrdeutigkeitslösung gelang mit Vernetzung im Mittel innerhalb von 30 s mit einer Standardabweichung von etwa 1.9 cm (3-D-Position) über 30 km, während ohne Nutzung der FKP nur eine Genauigkeit von etwa 8 cm nach im Mittel 1.5 min erreicht wurde.

Hinsichtlich ionosphärischer Störungen sind die Messungen im Jahr 1998 nicht stark betroffen. Demgegenüber ist die Ionosphäre zu den Untersuchungen im Jahr 2002 durch die Auswirkungen des Sonnenzyklus 23 gestört. In einem Referenzstationsnetz, das in etwa den Gegebenheiten an der Nordseeküste entspricht, wurden Effekte mit Auswirkungen von 1 ppm bis 4 ppm auf die Positionsgenauigkeit nachgewiesen. Die mittlere Dauer, um die Mehrdeutigkeiten festzusetzen, steigt in der Regel in Abhängigkeit der Entfernung zur Referenzstation an (etwa von 1 min bis 5 min bei 40 km). Die Fehlerquote bei der Mehrdeutigkeitslösung betrug bei Entfernungen unter 40 km zwischen 2% und etwa 12%.

Die Vernetzung von Referenzstationen erhöht die Verfügbarkeit hochpräziser Positionen. Innerhalb eines Referenzstationsnetzes, deren Stationen etwa 40 km bis 60 km auseinander liegen, wurden die Mehrdeutigkeiten im Mittel etwa in 1 min erfolgreich gelöst. In weniger als 1% der Fälle kam es dabei zu falschen Mehrdeutigkeitsfestsetzungen. Die dreidimensionale Genauigkeit der Positionsbestimmung liegt bei 2 cm bis 3 cm innerhalb und zum Teil auch ausserhalb des von den vernetzten Referenzstationen umschlossenen Gebietes.

Auf der Basis der Ergebnisse und vorhandener SAPOS-Stationen wird ein Referenzstationsnetz an der deutschen Nord- und Ostseeküste vorgeschlagen, das eine Vernetzung der für präzise Vermessungs-Anwendungen wichtigen Messgebiete erlaubt. Das SAPOS-Netz wird dabei nur um wenige Stationen erweitert. Die Realisierung dieser Stationsvernetzung erfordert das Zusammenspiel verschiedener Stationsbetreiber und damit auch eine einheitliche Anwendung der Datenverarbeitung und -abgabe.

Kapitel 6

Stationsabhängige Fehleranteile der GPS-Positionsbestimmung

Zu den stationsabhängigen Fehleranteilen zählen insbesondere die Variationen der Phasenzentren der Empfängerantennen und die Mehrwegeeffekte. Abhängig von der eingesetzten Ausrüstung und von den Umgebungsbedingungen auf den Referenzstationen können Fehler mit Größenordnungen von mehreren Zentimetern und damit systematische Effekte bei der Modellierung des Fehlerhaushalts in Referenzstationsnetzen auftreten. Eine weitgehende Stationskalibrierung führt zur Verbesserung der Sicherheit und Genauigkeit der GPS-Positionsbestimmung.

Zur Ermittlung der PCV sind relative und absolute Kalibrierverfahren verfügbar. Bei bewegter Antenne muss für die hochpräzise Positionsbestimmung auch die Orientierung der Antenne im WGS84 berücksichtigt werden, um die PCV reduzieren zu können. Entsprechende Untersuchungen werden in Abschnitt 6.1.3 vorgenommen.

Zur absoluten Bestimmung der Mehrwegeinflüsse auf Referenzstationen wurde ein neues Verfahren entwickelt, das auf der Dekorrelation des Multipath mit Hilfe eines Roboterarmes beruht. Das "Hannoversche Verfahren" wird in Kapitel 6.3 beschrieben und untersucht.

6.1 Variationen der Phasenzentren der Empfängerantennen

Die Eigenschaften einer GPS-Antenne werden durch das elektronische Design (z.B. Kreuzdipol, Microstrip, Vorverstärker) und durch das mechanische Design der umgebenden Konstruktionen (Baumaterialien, Bauformen) bestimmt. So erhalten Antennen mit gleichem elektronischem Design durch unterschiedliche Bauformen (z.B. *choke ring*, Grundplatte) verschiedene Eigenschaften, die sich zudem innerhalb eines Bautyps durch Fertigungstoleranzen unterscheiden können.

Somit hat jede Antenne eine eigene Empfangscharakteristik, die je nach Richtung des einfallenden Signals bezüglich eines Antennen-Koordinatensystems variiert. Dies hat zur Folge, dass sich die originären Phasemessungen nicht auf ein einziges Phasenzentrum beziehen. Die Parameter, die zur Beschreibung des Antennenverhaltens dienen, sind in der Abbildung 6.1 dargestellt. Die Abweichung von einem mittleren elektromagnetischen Phasenzentrum werden als Phasenzentrumsvariationen (PCV) bezeichnet. Die Größe der PCV in Bezug zu dem mittleren Phasenzentrum kann bis etwa 3 cm betragen. Die PCV sind abhängig von den Konstruktionsmerkmalen der GPS-Empfangsantennen. Sie variieren in Abhängigkeit von der Frequenz des Messsignals und von Azimut und Elevation des einfallenden Signals.

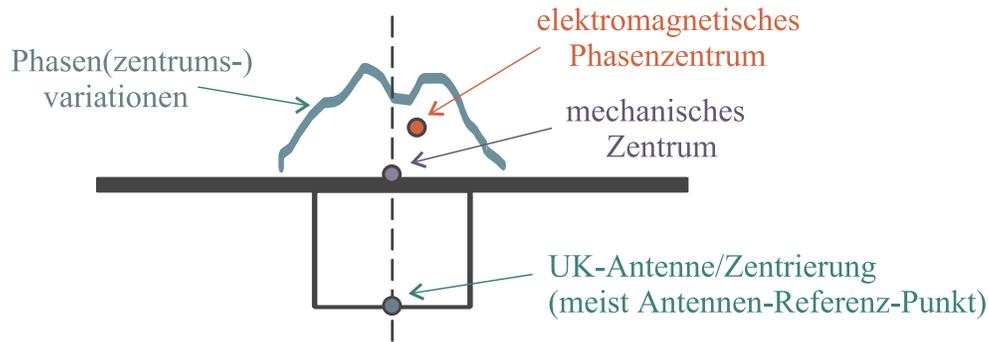


Abbildung 6.1: Bezugspunkte der GPS-Messungen.

Phasenzentrumsvariationen lassen sich durch relative oder absolute Antennenkalibrierungen bestimmen. Bestandteile eines vollständigen Kalibrierungsdatensatzes sind:

- die Definition des Antennen-Referenz-Punktes (engl: *antenna reference point*, ARP). Dieser wird mechanisch definiert, üblicherweise als der Durchstoßpunkt der Stehachse der Antenne zum untersten Punkt des Antennengehäuses
- der Offset des mittleren Phasenzentrums für die entsprechenden Messfrequenzen (L1/L2), angegeben bezüglich des ARP
- die Phasenzentrumsvariationen für die einzelnen Messfrequenzen, angegeben bezüglich des Offsets.

Mit Hilfe dieser Angaben lässt sich jede Phasenmessung in Abhängigkeit der Einfallsrichtung des Signals auf den ARP zentrieren. Die PCV können auch direkt auf den ARP bezogen werden. Der Offset wird dann nicht berücksichtigt beziehungsweise im ARP angegeben.

Eine weitere Möglichkeit, die Einflüsse der PCV auf die Positionsbestimmung zu reduzieren, ist mit der Verwendung desselben Antennentyps auf Referenz- und Roverstation gegeben. Jedoch weisen Untersuchungen (z.B. [Wübbena et al. 2000]) nach, dass sich die PCV von Antennen desselben Typs unterscheiden können. Dies ist zumeist durch den herstellereitig nicht eindeutig definierten Einbau von Komponenten, aber auch durch unsachgemäße Behandlung bedingt. Eine Überprüfung des mittleren Offsets kann hierüber Hinweise, aber keine sichere Information geben. Je nach Anwendung und Genauigkeitsanforderung können die verschiedenen Kalibrierungen in den meisten geodätischen Auswertesystemen zur Reduzierung des Effektes berücksichtigt werden.

6.1.1 Antennenkalibrierungen

Bestimmung des mittleren Offsets

Die einfachste Methode zur Überprüfung der Antennencharakteristik ist die Bestimmung des mittleren Offsets durch Messungen im Felde. Für viele Anwendungen, die lediglich Genauigkeiten von wenigen Zentimetern erfordern - wie dies in marinen Anwendungen zumeist der Fall ist - reicht eine solche Offsetbestimmung aus, um die Antenne zu überprüfen.

Die Bestimmung des absoluten mittleren Offsets des Phasenzentrums kann für die horizontalen Anteile recht einfach mit handelsüblicher Software für präzise Anwendungen durch eine "Messung in zwei Lagen" vorgenommen werden. Hierzu wird eine kurze Basislinie für wenige Stunden

mit zwei Antennen des gleichen Typs besetzt, wobei die Antennen gleich ausgerichtet sind. Anschließend wird eine Antenne um 180° gedreht und wiederum mit beiden Antennen mehrstündig beobachtet. Die Differenz der beiden gerechneten Vektoren zwischen Referenz- und Prüfantenne ergibt den doppelten horizontalen Offset des Phasenzentrums.

Die vertikale Komponente kann derart nicht absolut bestimmt werden, da das Phasenzentrum bei einer entsprechenden Drehung der Antenne zum Boden hin ausgerichtet werden würde. Die Bestimmung des vertikalen Offsets gelingt im einfachsten Fall nur relativ zwischen zwei Antennen. Zum einen kann der Offset aus einem Vergleich zwischen der GPS-Lösung einer kurzen Basislinie und einem präzisen Nivellement zwischen den beiden Punkten, zum anderen durch den Vergleich zweier Sessions mit getauschten Antennen bei gleicher Ausrichtung (engl.: *antenna swap*) bestimmt werden. Alle Verfahren können einfach mit handelsüblicher GPS-Auswertesoftware durchgeführt werden.

Die beschriebenen Verfahren haben generell den Nachteil, dass die Beobachtungen durch Mehrwegeeffekte beeinflusst werden. Die mittleren Offsets können besonders in der Höhenkomponente Größenordnungen von wenigen Zentimetern erreichen. Die alleinige Bestimmung des mittleren Offsets eignet sich auch nicht für ein leistungsfähiges, hochpräzises Referenzstationsnetz oder ein Pegelüberwachungsnetz. Hier sollten die präziseren vollständigen Kalibrierungsdatensets genutzt werden.

Relative Antennenkalibrierung

Die wohl bekanntesten GPS-Antennen-Kalibrierungen in der geodätischen Fachwelt sind die des *National Geodetic Survey* (NGS), Silver Spring, USA. Sie sind eng verknüpft mit dem Namen Gerald L. Mader. Die Ergebnisse sind auf den Internetseiten des NGS (<http://www.ngs.noaa.gov>) frei verfügbar veröffentlicht.

Das Verfahren wird unter anderem in [Mader 1999] beschrieben. Es basiert auf Feldmessungen auf zwei Pfeilern (Abstand 5 m) mit festen Montierungen zum Anbringen von GPS-Antennen, die mit geodätischen Zweifrequenz-Empfängern betrieben werden. Für alle Messungen wird eine *Dorne/Margolin choke ring T* Antenne verwendet, die vom *Jet Propulsion Laboratory* entwickelt wurde (Bezeichnung JPL D/M+crT). Bei *choke ring* Antennen werden Multipatheffekte, die von Reflektoren unterhalb des Antennenhorizontes hervorgerufen werden, durch konzentrische Metallstreifenringe reduziert. Die JPL D/M+crT Antenne wird als Referenzantenne für das IGS-Netz (siehe Abschnitt 3.3.4) genutzt und weist nur geringe azimutale Effekte auf. Die Empfänger sind über ein Rubidiumnormal an eine gemeinsame Zeitfrequenz gebunden. Für die Kalibrierungsmessungen werden lediglich Satelliten oberhalb einer Elevationsmaske von 10° zugelassen.

Die Offsets der Referenzantenne werden aus langjährigen Beobachtungen als bekannt vorausgesetzt. Als Beobachtungsgrößen werden die Doppeldifferenzen der Linearkombinationen L_1 , L_2 und L_0 verwendet. Nach 24 Stunden Messungen werden aus dem Vergleich zwischen gemessenen und gegebenen Koordinatendifferenzen die Offsets des Prüflings bestimmt.

Die Einfachdifferenzen zwischen beiden Stationen zu einem Satelliten dienen als Beobachtungsgröße zur Bestimmung der PCV. In der Gleichung 6.1 ist diese Einfachdifferenz zwischen Referenz- (R) und Testantenne (T) dargestellt. Die Terme, deren Anteile durch das relative Beobachtungsverfahren auf kurzer Basislinie, durch den Einsatz einer gemeinsamen Zeitbasis und durch die Kenntnis der Koordinatenunterschiede eliminiert werden, werden nicht aufgeführt. Die Gleichung folgt der Notation der Formeln 3.1 bis 3.5.

$$PR_{f,R}^j - PR_{f,T}^j = \delta A_{f,R}^j - \delta A_{f,T}^j + \delta M_{s,R}^j - \delta M_{s,T}^j + \delta d_{s,R} - \delta d_{s,T} + \epsilon_{s,RT}^j \quad (6.1)$$

Der verbleibende Mehrwegeeinfluss $\delta M_{s,R}^j - \delta M_{s,T}^j$ wird durch eine geeignete Standortwahl reduziert, die Einflüsse der Hardwareverzögerungen $\delta d_{s,R} - \delta d_{s,T}$ werden durch den Einsatz identischer Empfänger klein gehalten. Somit verbleibt ein um $\sqrt{2}$ (Fehlerfortpflanzung) erhöhtes Trägerphasenrauschen der Einfachdifferenz-Beobachtung. Setzt man die PCV der Referenzantenne $\delta A_{f,R}^j$ als bekannt voraus, so ergeben sich aus der obigen Gleichung die PCV der Testantenne $\delta A_{f,T}^j$. Die PCV werden elevationsabhängig mit Hilfe von Polynomen 4. Ordnung berechnet und in Form von Tabellen in 5° Schritten veröffentlicht.

Verschiedene Gruppen nutzen den vom NGS erstellten Datensatz, um eigene relative Kalibrierungen durchzuführen. Die NGS-Typenkalibrierungen werden dabei als Grundlage verwendet, um eigene Referenzantennen relativ zu der JPL D/M+crT als bekannt voraussetzen zu können.

Absolute Antennenkalibrierung

Relative Antennenkalibrierungen sind für viele Anwendungen hinreichend. Jedoch haben sie den Nachteil, dass sie ortsabhängig sind, sich auf eine Referenzantenne beziehen und dass trotz aller Bemühungen Resteffekte von Mehrwegeeffekten in den Kalibrierungen enthalten sein können.

Verschiedene Forschungsgruppen ([Schupler et al. 1994], [Schupler et al. 1995], [UNAVCO 1995], [UNAVCO 1997], [Breuer et al. 1995]) nutzen Dreh- und Kippapparaturen in sogenannten "mikrowellentoten" Räumen (engl.: *anechoic chamber*), um absolute Kammerkalibrierungen unter Laborbedingungen für GPS-Antennen zu erstellen. Die Auskleidung der Labore mit entsprechenden Dämmmaterial soll die Mehrwegeausbreitung verhindern. Die Antennen werden mit einer Vorrichtung schrittweise um einen definierten Punkt (z.B. ARP) gedreht und gekippt, so dass die Phasenverzögerungen der Antenne über den Antennenhorizont und auch darunter direkt gemessen werden können.

Ein Verfahren zur Absoluten Feldkalibrierung von GNSS-Antennen wurde gemeinsam von der Geo++[®] und dem Institut für Erdmessung entwickelt. Mit Hilfe eines Roboterarmes wird die zu kalibrierende Antenne gedreht und gekippt. Die Messungen zu einer zweiten Referenzantenne werden genutzt, um entfernungsabhängig wirkende Fehleranteile zu eliminieren. Beobachtungsgröße der Messung sind die Differenzen der Phasenbeobachtungen verschiedener, schnell aufeinanderfolgender Roboterarm-Stellungen. Unter den Bedingungen, dass

- auf der Referenzstation R und auf der Prüfstation P die gleichen entfernungsabhängigen Fehleranteile wirken,
- sich die Größe der Phasenzentrumsvariationen auf der Referenzstation R $d\delta A_{f,R}^j$ in zwei aufeinanderfolgenden Messepochen nicht ändert,

ergibt sich abgeleitet aus den Formeln 3.1 bis 3.5 die Formel 6.2 für die auszugleichenden Differenzen der Phasenzentrumsvariationen auf der Prüfstation $d\delta A_{f,P}^j$. Die Antennenorientierungen der Prüfantenne zweier aufeinanderfolgender Messepochen unterscheiden sich in der Kippung der Z-Achse z um Δz und in der Drehung in Azimutrichtung α um $\Delta\alpha$ der Antenne.

$$d\delta A_{f,P}^j(\alpha, z) = \delta A_{f,P}^j(\alpha, z) - \delta A_{f,P}^j(\alpha + \Delta\alpha, z + \Delta z) + d\delta M_{s,R-P}^j + \epsilon \quad (6.2)$$

Die verbleibenden Mehrwegeeffekte $d\delta M_{s,R-P}^j$ werden mit hoher zeitlicher Korrelation als stochastischer Prozess modelliert. Durch die kurze Zeit zwischen aufeinander folgenden Messungen werden die Mehrwegeeffekte aus den Beobachtungsgrößen eliminiert. Eventuelle Resteffekte werden aber bereits durch Messungen zu hochstehenden Satelliten reduziert. Das Kalibrierungsergebnis wird mit einer Kugelfunktionsentwicklung aus den Beobachtungsgrößen abgeleitet.

Näheres zu dem Verfahren der Absoluten Feldkalibrierung und dessen Untersuchung wird in [Wübbena et al. 1997], [Seeber et al. 1997], [Menge et al. 1998], [Menge und Seeber 1999], und [Wübbena et al. 2000] dargestellt.

6.1.2 Auswirkungen der PCV in Referenzstationsnetzen

Unter der Voraussetzung, dass bei kleinräumigen Netzen und Verwendung identischer Antennentypen die PCV und die Ausrichtung der Antennen gleich sind, sind nur geringe Auswirkungen auf die Messgenauigkeit zu erwarten, wenn die PCV nicht berücksichtigt werden. Allerdings ist bei unkalibrierten Antennen nie gewiss, ob deren PCV mit den Typenkalibrierungen übereinstimmen. Werden gemischte Antennentypen ohne Kalibrierung verwendet, kann es entsprechend der verwendeten Antennen zu Fehlern bis zu 10 cm kommen [UNAVCO 1997].

Die Ausrichtung stationärer Antennen erfolgt üblicherweise nach dem Schwerfeld und nach geographisch (oder magnetisch) Nord. In überregionalen beziehungsweise globalen Netzen (IGS) sind die Antennen somit in etwa um die Breiten- und Längendifferenz der entsprechenden Punkte zueinander gekippt und um einen berechenbaren Winkel im Raum gedreht. Die Signale eines Satelliten fallen in verschiedenen Winkeln in die Antennensysteme ein, so dass auch unterschiedliche PCV bei gleichen Antennentypen wirken.

Ein zusätzlicher Effekt insbesondere in großräumigen Netzen ergibt sich durch die hohe Korrelation der Einflüsse der

- Phasenzentrumsvariationen der Empfängerantenne,
- Modellierung der Troposphäre,
- Stationskoordinaten und
- der Phasenzentrumsvariationen der Satellitenantenne.

Der Zusammenhang wird oft populär als "Bermuda-Viereck" bezeichnet. Die Topologie der PCV ist über die *mapping function* mit der Modellierung der Troposphäre (siehe Kapitel 4.1) korreliert. Unzureichend modellierte Empfängerantennen-PCV führen unter anderem bei Nutzung einer Troposphärenmodellierung zu Höhenfehlern in den Stationskoordinaten. Stationskoordinaten und die Phasenzentrumsvariationen der Satelliten sind über die Bahnmodellierung direkt miteinander verknüpft. Sind drei der Parameter im absolutem Sinne bekannt, lässt sich der vierte bestimmen. In regionalen Netzen spielen die PCV der Satellitenantennen keine Rolle, da sich der Fehler bei gleichem Austrittswinkel an der Satellitenantenne wie ein Uhrfehler auswirkt.

Zur Verdeutlichung dieses Zusammenhanges wird das im Kapitel 4.2 angesprochene Beispiel des IGS aufgegriffen. [Menge und Seeber 1999] weisen nach, dass bei Verwendung absoluter Phasenzentrumsvariationen in einem globalen Netz mit JPL D/M+crT Antennen bei Verwendung präziser Satellitenephemeriden ein Maßstabsfaktor von etwa 14 ppb zwischen den Lösungen mit und ohne Verwendung von absoluten PCV ergibt. Die Berechnung ohne Verwendung der PCV entspricht dem Vorgehen des IGS, da die JPL D/M+crT Referenzantenne dort mit festgelegten Offsets und allen PCV=0.0 m eingeführt wird. Im IGS-Netz passt jedoch die Netzberechnung mit den ITRF-Lösungen, die aus VLBI, SLR und GPS-Messungen berechnet werden, auf 3 ppb überein. Ein Grund ist, dass die IGS-Messungen in die ITRF-Lösungen einfließen. Die Berechnung mit absoluten Kalibrierungen ergab Abweichungen von -11 ppb von der ITRF-Lösung. Da die absoluten Werte theoretisch besser zur ITRF-Lösung passen sollten, kalibrierten [Mader und Czopek 2001] eine Satellitenantenne relativ zu einer JPL D/M+crT-Antenne. Es

konnten signifikante Abweichungen zu den a priori Annahmen über das Verhalten der Satellitenantennen aufgedeckt werden. Führt man die relativen Kalibrierungen der Satellitenantennen testweise in das IGS-Netz ein, so reduziert sich der Maßstabeffekt zum ITRF bei Berechnung mit absoluten PCV auf -5 ppb. Da die bereits im Orbit befindlichen Satellitenantennen schwerlich zu kalibrieren sind, wird die Auflösung des "Bermuda-Vierecks" nur über die Verbesserung der Stationskoordinaten und die Verwendung von absoluten PCV zu lösen sein.

Ein Beispiel für die Korrelation zwischen PCV und Troposphäre wird in [Menge und Seeber 1999] beschrieben. In einem Test wurde der Datensatz einer *Ashtech Choke Ring* Antenne dupliziert, um eine *zero baseline* zu simulieren. Die PCV der *Ashtech Choke Ring* Antenne sind der JPL D/M+crT sehr ähnlich. Einer der Datensätze wurde mit absoluten PCV reduziert, der andere blieb unkorrigiert. Bei der Auswertung mit Schätzung von Troposphärenparametern ergaben sich nur geringfügige Lageabweichungen. Bei Verwendung der ionosphärenfreien Linearkombination L_0 wurde in der Höhenkomponente eine Höhendifferenz von 2.2 cm ohne und 8.1 cm mit Schätzung eines troposphärischen Maßstabparameters nachgewiesen. Die nicht berücksichtigten elevationsabhängigen Anteile der PCV verursachen dabei die unzureichende Schätzung der Troposphärenmodellierung und verursachen die beschriebenen Effekte.

Restfehler bei der PCV-Modellierung gehen bei der Zustandsmodellierung im Referenzstationsnetz in den Fehlerhaushalt ein und verschlechtern die Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Schnelligkeit der Netzlösungen. Daher ist bei Referenzstationen und auf statischen Punkten, für die hochpräzise Ergebnisse ermittelt werden sollen, eine absolute PCV-Kalibrierung zu empfehlen.

6.1.3 Auswirkungen der PCV auf bewegten Plattformen

Um verschiedene Kalibrieransätze in kinematischen Anwendungen zu testen, wurden auf einem Roboterarm des IfE mehrfach Kreisbewegungen mit einer *Ashtech Marine* Antenne (Serie 700700B) durchgeführt. Die Kreisbewegung wurde mit einer Genauigkeit von besser als 1 mm auf konstanter und bekannter Höhe durchgeführt, die als Sollwert varianzfrei eingeführt werden kann. Die Antenne wurde permanent in der Bewegung nach geographisch Nord ausgerichtet und horizontal geführt. Die Referenzstation war mit einer *Ashtech Geodetic II* Antenne (Serie 700228D) ausgerüstet. Im Postprocessing sind verschiedene Antennen-Kalibriersätze mit demselben Datenmaterial getestet worden. Die Reduzierung der Beobachtungen auf den ARP der Antenne wurde mit den folgenden Werten untersucht:

- Hersteller-Höhenoffset, festgelegt durch die an der Antenne befindliche Marke. Der Wert ist mit einer Genauigkeit von etwa 0.1 mm mit einem Feinmessinstrument bestimmt. Dies ist der Bezugspunkt für den Nutzer, wenn keine weiteren Kalibrierungen bekannt sind.
- relative NGS-PCV-Kalibrierung (siehe Abschnitt 6.1.1), wobei nur die Offsets verwendet werden. Die Kalibrierungen sind Typmittel und im Internet (<http://www.ngs.noaa.gov>) frei verfügbar.
- absolute IfE-PCV-Kalibrierung, wobei nur die Offsets verwendet werden.
- relative NGS-PCV-Kalibrierung mit elevationsabhängigen PCV.
- absolute IfE-PCV-Kalibrierung mit elevationsabhängigen und azimutabhängigen PCV.

Ausschnitte der Untersuchungen sind in Tabelle 6.1 nachgewiesen.

		Höhe und Differenz zum Soll		Standardabweichungen	
		Höhenmittel [m]	Differenz [m]	Höhenmittel [m]	Sigma0 [m]
Sollwert		114,018	-	-	-
Hersteller-	L_1	114.011	-0.007	0.0073	0.0029
Offset	L_0	114.007	-0.011	0.0180	0.0078
NGS-	L_1	114.015	-0.003	0.0073	0.0029
Offset	L_0	114.035	0.017	0.0178	0.0078
IfE-	L_1	114.008	-0.010	0.0073	0.0029
Offset	L_0	114.010	-0.008	0.0179	0.0078
NGS-	L_1	114.012	-0.006	0.0070	0.0028
PCV	L_0	114.025	0.007	0.0183	0.0082
IfE-	L_1	114.016	-0.002	0.0064	0.0029
PCV	L_0	114.019	0.001	0.0175	0.0069

Tabelle 6.1: Verwendung verschiedener Antennenkalibriersätze in kinematischer Anwendung. Vergleich anhand der Höhenbestimmung. Ergebnisse für L_1 und L_0 nach [Bachmann 2001].

Die Differenzen der Koordinatenlösungen werden im Folgenden als stochastisches Signal behandelt. Zur Beurteilung der Variationsbreite wird die Standardabweichung σ berechnet. Die Standardabweichungen der Höhenmittel differieren nur geringfügig, ebenso wie die Standardabweichungen (Sigma0) der Auswertung. Die innere Genauigkeit des Höhenmittels zeigt für die absolute IfE/Geo++[®]-Kalibrierung die besten Ergebnisse. Die Abweichungen bei den Standardabweichungen liegen jedoch bei maximal 0.9 mm und sind deshalb insgesamt vergleichbar. Aussagekräftiger sind die Abweichungen des Höhenmittels zum Sollwert, der durch Nivellement bestimmt wurde. Aufgrund der kurzen Stationsentfernungen über wenige Meter können die nivellistisch bestimmten Höhenunterschiede mit genügender Genauigkeit mit den ellipsoidischen gleichgesetzt werden. Die IfE-Absolutkalibrierung zeigt auch hier die besten Ergebnisse mit 2 mm für die L_1 - und 1 mm für die L_0 -Auswertung. Die relativen NGS-PCV weisen 6 mm und 7 mm auf. Die größten Diskrepanzen ergeben sich bei der Verwendung des NGS-Offsets: zwar ergibt sich mit nur 3 mm ein genaues Höhenmittel für L_1 , jedoch weist die L_0 -Lösung eine Abweichung von 17 mm auf. Ohne Verwendung von Kalibrierungen - mit Bezug auf die Herstellerangaben - werden Abweichungen von 7 mm für L_1 und 11 mm für L_0 des Höhenmittels vom Soll erreicht.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Höhenzuordnung mit der absoluten Antennenkalibrierung nach dem IfE/Geo++[®]-Verfahren die geringsten Abweichungen zum Sollwert liefert. Die alleinige Verwendung von Offsets aus den Kalibrierungen erbringt kaum eine Verbesserung. Für den Einsatz auf kinematischen Plattformen muss mit der Neigung beziehungsweise Drehung der Antennen gerechnet werden, die bei der Reduzierung der PCV berücksichtigt werden müssen. Im Folgenden wird hierauf näher eingegangen.

Berücksichtigung von Lagewinkeln

Die Antennen bewegter Plattformen sind üblicherweise gegenüber den stationären Referenzantennen gekippt und gedreht. Die Anbringung der PCV-Korrekturen auf bewegten Plattformen setzt voraus, dass die Orientierung der GPS-Antenne im Raum bekannt ist, da die PCV in Bezug zu dem Antennen-Koordinatensystem gegeben sind. Eine Transformation über Kurs, Rollen und Stampfen kann hinzugezogen werden, um die Einfallswinkel der Satelliten im Antennensystem zu bestimmen. Die Orientierung der Antenne im Raum kann über inertielle Messsysteme oder aber über ein Mehrantennenarray bestimmt werden (siehe Kapitel 7.2 und 7.4).

Antennenname	Typ	Offset L_1			Offset L_2		
		dN [m]	dE [m]	dH [m]	dN [m]	dE [m]	dH [m]
<i>Ashtech Geodetic II</i>	700228D	-0.0021	-0.0013	0.0613	-0.0034	0.0020	0.0672
<i>Ashtech Marine</i>	700700B	-0.0024	0.0000	0.0349	0.0007	-0.0005	0.0464
<i>Trimble choke ring</i>	29659.00 snow	-0.0004	0.0004	0.0901	-0.0001	0.0002	0.1192

Tabelle 6.2: Auswirkung der PCV in kinematischen Anwendungen: verwendete Antennentypen mit Offsets aus absoluten Kalibrierungen.

Auswirkung von Lageänderungen bei Anbringung der PCV ohne Offset

Die Auswirkungen durch Vernachlässigung der Lagewinkel bei der Reduzierung der Phasenzentrumsvariationen wird durch eine Simulation abgeschätzt. Das absolute mittlere elektromagnetische Phasenzentrum wird hier als bekannt vorausgesetzt, so dass nur die Einflüsse der Abweichung von diesem untersucht werden. Die Daten einer statischen Referenzstation werden dupliziert und zum einen als statische Referenzstation und zum anderen als mobiler Rover in eine GPS-Auswertung eingeführt. Absolute Antennenkalibrierungen werden manipuliert, indem ihre absoluten mittleren Offsets auf Null gesetzt werden und somit der Bezugspunkt (ARP) der PCV in das mittlere elektromagnetische Phasenzentrum gelegt wird. Die Kalibrierungen werden statisch auf die Referenzstation und mit Neigung und Drehung im mittleren Phasenzentrum auf den mobilen Datensatz angebracht. Der Differenzvektor der Position zwischen den beiden Datensätzen ist gleich Null, wenn keine Neigung und Drehung der Antenne erfolgt. Für andere Stellungen bewirkt die Lageänderung der mobilen Antenne eine Differenz im Positionsvektor.

Tabelle 6.3 und Abbildung 6.2 zeigen beispielhaft Ergebnisse einer solchen Auswertung für die drei Antennentypen *Ashtech Geodetic II* (700228D), *Ashtech Marine* (700700B) und *Trimble Choke Ring* mit einem *Dome* (29659.00 snow) für die Positionsdifferenzen des L_1 -Trägerphasensignals und die ionosphärenfreie Linearkombination L_0 . Die Rover-Antenne wird mehrfach in 2° -Schritten zwischen -15° und $+15^\circ$ geneigt und das Azimut in 10° -Schritten über den gesamten horizontalen Vollkreis variiert. Für die Simulation wurde ein realer Datensatz über etwa sechs Stunden gewählt. Somit sind die berechneten Positionsdifferenzen auch von der jeweiligen Satellitenkonfiguration abhängig. Die Antennentypen sind in Tabelle 6.2 kurz beschrieben.

Die Standardabweichungen erreichen bei den für hydrographische Anwendungen typischen Neigungen von etwa 5° nur für die Linearkombination L_0 Werte über 1 cm. Bei starken Neigungen bis 15° erhöht sich die Standardabweichung auf maximal etwa 2 cm. *Choke ring*-Antennen haben bekanntermaßen gleichförmige Empfangseigenschaften im Azimut, die PCV weisen aber stärkere Gradienten im Elevationsbereich auf. Entsprechend sind die Standardabweichungen für geringe Neigungen sehr gering, für stärkere Neigungen jedoch größer als bei den anderen beiden Antennentypen. Die Antennentypen *Ashtech Geodetic II* und *Ashtech Marine* zeigen zueinander vergleichbare Auswirkungen in der Untersuchung.

Auswirkung von Lageänderungen bei Anbringung der PCV mit Offset

Antennenkalibrierungen beziehen sich üblicherweise auf einen ARP an der Unterseite des Antennengehäuses. Wird eine solche Kalibrierung verwendet, jedoch die Lagewinkel nicht berücksichtigt, wirkt zusätzlich zur obigen Untersuchung der mittlere Offset als systematischer Fehlereinfluss. Vereinfacht wird der Zusammenhang in Abbildung 6.3 dargestellt. Die Neigung der Antenne um den Winkel γ wird als Abweichung in der Höhenkomponente und in der Horizontalen sichtbar, während eine alleinige Drehung um den Kurswinkel α sich nur in den horizontalen Komponenten dN und dE auswirkt.

Signal Neigung γ	L_1				L_0			
	0°	5°	10°	15°	0°	5°	10°	15°
Standardabweichungen <i>Ashtech Geodetic II</i>								
Nord	0.0028	0.0032	0.0042	0.0056	0.0064	0.0065	0.0071	0.0083
Ost	0.0018	0.0023	0.0034	0.0047	0.0035	0.0037	0.0045	0.0057
Höhe	0.0033	0.0036	0.0043	0.0054	0.0079	0.0082	0.0084	0.0093
Standardabweichungen <i>Ashtech Marine</i>								
Nord	0.0033	0.0037	0.0047	0.0061	0.0049	0.0052	0.0062	0.0075
Ost	0.0023	0.0028	0.0038	0.0051	0.0030	0.0033	0.0039	0.0049
Höhe	0.0038	0.0042	0.0051	0.0066	0.0059	0.0070	0.0096	0.0129
Standardabweichungen <i>Trimble Choke-Ring + Dome</i>								
Nord	0.0005	0.0025	0.0049	0.0073	0.0009	0.0034	0.0065	0.0095
Ost	0.0003	0.0021	0.0042	0.0063	0.0005	0.0028	0.0054	0.0081
Höhe	0.0005	0.0029	0.0058	0.0086	0.0010	0.0042	0.0083	0.0121

Tabelle 6.3: Auswirkung der Phasenzentrumsvariationen (ohne Offset) bei der Anbringung von Antennenkalibrierungen ohne Lagewinkel γ in kinematischen Anwendungen. Antennentypen: *Ashtech Geodetic II* (700228D), *Ashtech Marine* (700700B) und *Trimble choke ring*-Antenne (29659.00 SNOW). Einheit [m].

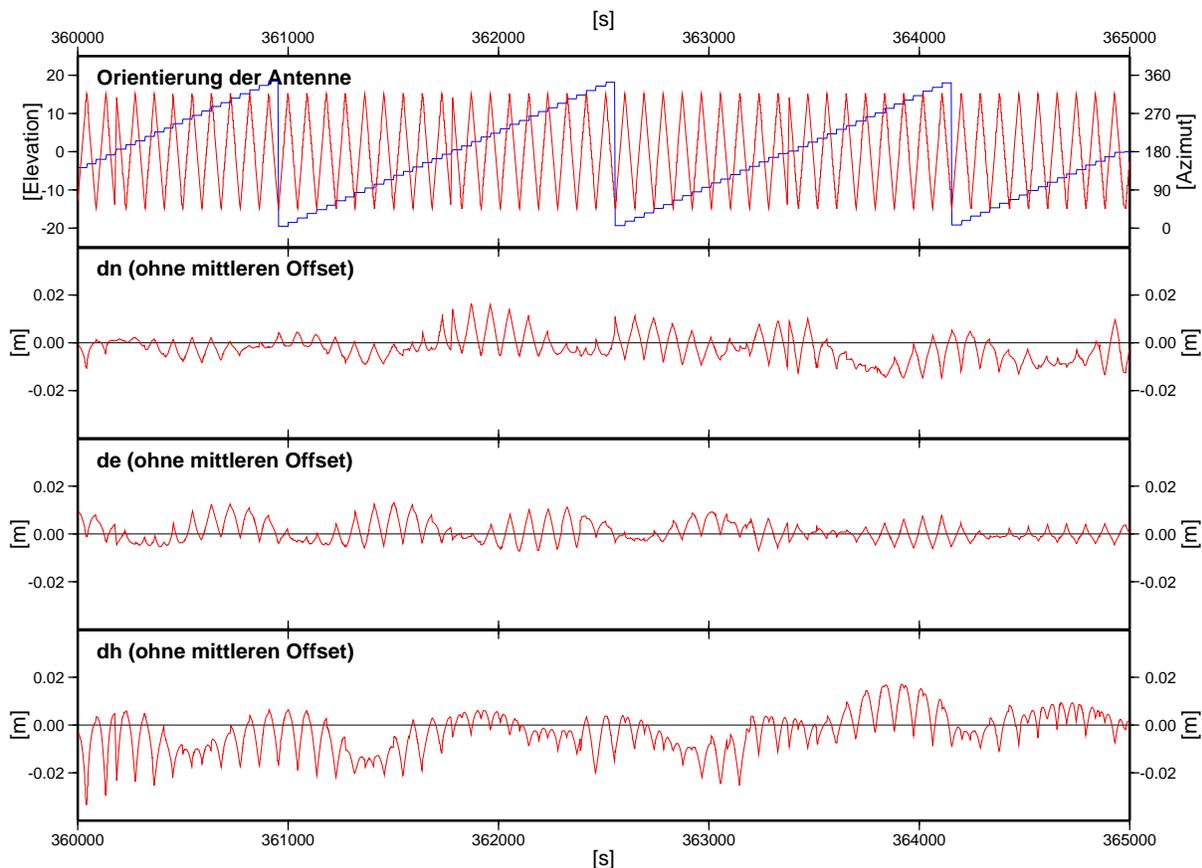


Abbildung 6.2: Auswirkung der Phasenzentrumsvariationen ohne Betrachtung des Offsets bei der Anbringung von Antennenkalibrierungen ohne Lagewinkel in kinematischen Anwendungen. Hier: Auszug aus L_0 -Auswertung mit *Ashtech Marine*-Antenne.

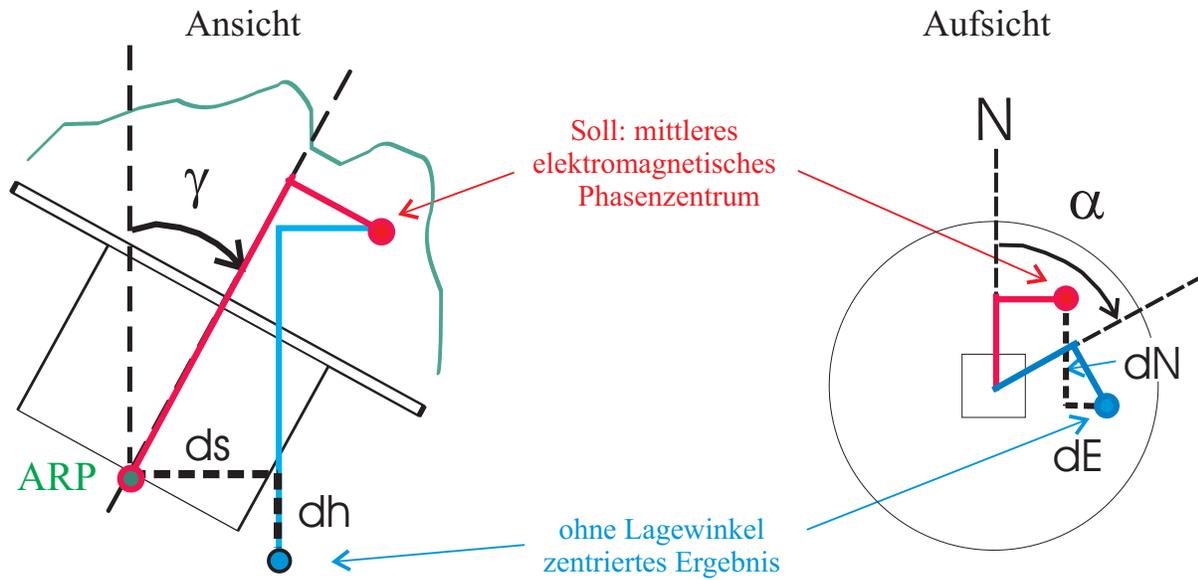


Abbildung 6.3: Auswirkung nicht berücksichtigter Neigungen γ (linke Grafik) und Drehungen α (rechte Grafik) auf die Reduzierung mit mittlerem Offset auf den ARP.

Signal	L_1				L_0			
Neigung γ	0°	5°	10°	15°	0°	5°	10°	15°
Standardabweichungen <i>Ashtech Geodetic II</i>								
Nord	0.0029	0.0056	0.0101	0.0147	0.0079	0.0089	0.0122	0.0161
Ost	0.0032	0.0058	0.0100	0.0147	0.0100	0.0107	0.0133	0.0168
Höhe	0.0032	0.0037	0.0045	0.0057	0.0079	0.0082	0.0085	0.0095
Standardabweichungen <i>Ashtech Marine</i>								
Nord	0.0053	0.0061	0.0081	0.0107	0.0116	0.0116	0.0127	0.0139
Ost	0.0029	0.0041	0.0065	0.0094	0.0062	0.0067	0.0073	0.0088
Höhe	0.0038	0.0042	0.0050	0.0061	0.0059	0.0070	0.0096	0.0128
Standardabweichungen <i>Trimble Choke-Ring + Dome</i>								
Nord	0.0005	0.0074	0.0149	0.0220	0.0010	0.0058	0.0114	0.0168
Ost	0.0005	0.0073	0.0144	0.0219	0.0009	0.0055	0.0107	0.0162
Höhe	0.0005	0.0029	0.0057	0.0082	0.0010	0.0042	0.0083	0.0119

Tabelle 6.4: Auswirkung der Phasenzentrumsvariationen mit Offset bei der Anbringung von Antennenkalibrierungen ohne Lagewinkel γ in kinematischen Anwendungen. Antennentypen: *Ashtech Geodetic II* (700228D), *Ashtech Marine* (700700B) und *Trimble choke ring*-Antenne (29659.00 SNOW). Einheit [m].

Die Größe des Effektes wird beispielhaft in Tabelle 6.4 dargestellt. Als Grundlage für die Untersuchungen wird der oben beschriebene Ansatz mit denselben Antennen verwendet. Im Vergleich zu den Untersuchungen ohne absoluten Offset variieren die horizontalen Komponenten wesentlich stärker, da sich bei geringen Neigungen der horizontale Offset und bei Neigungen der im Vergleich zu den Lageoffsets größere Höhenoffset mit dem Sinus der Neigung auswirkt. Für die Neigung $\gamma = 5^\circ$ des Höhenoffsets ergibt sich so eine Änderung der horizontalen Koordinaten um 87.2 ppm, bei $dH = 10$ cm also 8.7 mm. Demgegenüber ändern sich die Standardabweichungen der Höhenkomponente im Vergleich zu den Ergebnissen in Tabelle 6.3 kaum. Eine Änderung d_H der Höhe durch die Neigung γ des Höhenoffsets dH kann mit $d_H = dH \cdot (1 - \cos(\gamma))$ genähert werden, bei $\gamma = 5^\circ$ also etwa mit 3.8 ppm von dH , entsprechend 0.4 mm bei $dH = 10$ cm. Bereits ab 10° Neigung steigen die Standardabweichungen der Lagekomponenten der L_1 -Lösungen bei den beiden geodätischen Antennen über 1 cm. Die Differenzen *Ashtech Marine*-Antenne fallen aufgrund der Bauweise (geringer Höhenoffset im Vergleich zu den geodätischen Antennen) wesentlich geringer aus.

Besonders bei der ionosphärenfreien Linearkombination L_0 können abhängig von der verwendeten Antenne bereits bei geringen Neigungen Abweichungen von mehreren Zentimetern erreicht werden, wenn die Neigungen der Antenne bei Reduzierung mit einer Antennenkalibrierung nicht berücksichtigt werden. Werden die Orientierungen nicht gemessen, muss der Bezugspunkt für die Messungen bestmöglichst in das mittlere elektromagnetische Phasenzentrum gelegt werden, um die Fehler zu minimieren.

6.1.4 Fazit

Unberücksichtigte Phasenzentrumsvariationen der Empfängerantennen beeinträchtigen die Genauigkeit der Positionsbestimmung sowohl auf statischen Punkten (Referenzstationen, Pegelpunkte) als auch auf mobilen Roverstationen. Die Auswirkungen der PCV lassen sich nicht in jedem Falle durch die Verwendung baugleicher Antennen eliminieren. Abweichungen in der Bauweise und in der Orientierung der Antennen führen zu Modellierungsungenauigkeiten.

In Referenzstationsnetzen oder auf quasi statischen Punkten (z.B. stationäre Pegel, Fest- und Kontrollpunkte), die hochgenau mit GPS bestimmt werden sollen, wird eine absolute Kalibrierung der Antennen empfohlen. Dies gilt besonders für Höhenbestimmungen.

Für den Einsatz im Felde ist eine Kalibrierung der GPS-Antennen für Genauigkeitsanforderungen von besser als 3 cm ratsam. Bei dem typischen Einsatz auf Messschiffen in marinen Anwendungen wird eine Kalibrierung der PCV nicht zwingend erforderlich sein.

Die Verwendung von absoluten Antennenkalibrierungen ist im Hinblick auf Genauigkeit, Funktionalität und Modellierung der Fehleranteile am Besten geeignet. Für die Nutzung in hochpräzisen kinematischen Anwendungen mit geneigten und gegenüber der Nordrichtung gedrehten Antennen müssen die Lagewinkel der Antenne zur Reduktion berücksichtigt werden. Für hochpräzise Anwendungen muss daher zumeist ein Lage-Messsystem verfügbar sein, so dass die PCV in vollem Umfang angebracht werden können. Nähere Informationen zu Lagemesssystemen sind in Kapitel 7.2 und 7.4 zu finden.

Sollen absolute Kalibrierungen angewendet werden und sind keine Lagemessungen vorhanden, dann sollte das mittlere elektromagnetische Phasenzentrum als ARP verwendet werden.

6.2 Der Mehrwegeeinfluss

Treffen elektromagnetische Wellen auf geeignete Flächen, so können sie gebeugt (Beugung, Diffraktion) oder gespiegelt (Spiegelung, Reflexion) werden. Geeignete Flächen sind im Allgemeinen Grenzschichten, an denen zwei Medien unterschiedlicher elektromagnetischer Eigenschaften aufeinandertreffen. Die Umwegsignale können die Messungen zu GPS-Satelliten durch Überlagerung mit direkten Signalen wesentlich beeinflussen. Dieser Einfluss wird mit Mehrwegeeffekt (engl.: Multipath) bezeichnet. Im Folgenden soll nur auf den Multipath in der Umgebung der Empfängerantenne eingegangen werden, nicht auf den Einfluss des Mehrwegeeffektes am Satelliten. Letzterer ist bei der Positionsbestimmung auf kurzen Basislinien zu vernachlässigen bzw. geht auf langen Basislinien als entfernungsabhängiger Fehleranteil in die Modellierung ein.

6.2.1 Reflexion

Die Reflexion einer elektromagnetischen Welle mit hoher Frequenz erfolgt nach dem Reflexionsgesetz der Optik (Einfallswinkel = Ausfallswinkel). Tritt keine Totalreflexion ein, geht ein Teil der Strahlung in das zweite Medium über.

An leitenden Flächen treten zusätzlich elektromagnetische Wechselwirkungen auf, die zur Spiegelung des Feldvektors führen und somit zur Veränderung des Drehsinns einer zirkularen Polarisati-on. Bei der Reflexion der rechtsdrehenden, zirkular polarisierten Welle eines GPS-Satellitensignals entsteht hierdurch ein linksdrehendes, zirkular polarisiertes Umwegsignal.

Die Wirkungsfläche der spiegelnden Reflexion ist abhängig vom Einfallswinkel und von den Brechungseigenschaften des reflektierenden Materials. Nach [Boithas 1987] hat sie bei einer vollständig spiegelnden Reflexion die Form einer Fresnelzone, die entsteht, wenn man die Reflektoroberfläche und das erste Fresnelellipsoid verschneidet. Fresnelellipsoide sind die geometrischen Orte im Raum, für die die Signalwege zum Sender und zum Empfänger um $m\lambda/2$ (mit $m = 1, 2, \dots$) größer sind als der direkte Signalweg zwischen Sender und Empfänger. In den Brennpunkten dieser Ellipsoide befinden sich der Sender und der Empfänger. Der Radius der Fresnelzone b für das erste Fresnelellipsoid $m = 1$ kann nach [Boithas 1987] näherungsweise aus der Wellenlänge des Signals λ und der Entfernung d zwischen Empfänger und Reflektor wie in Formel 6.3 abgeschätzt werden.

$$b \approx \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\lambda \cdot d} \quad (6.3)$$

Die Formel kann zur Identifizierung möglicher Reflektoren in der Antennenumgebung herangezogen werden. Der zweifache, kleine Durchmesser $2b$ einer solchen Fläche ergibt sich somit in etwa für die L_1 -Trägerphase des GPS für eine Entfernung $d = 10$ m mit $2b = 1.4$ m, für $d = 100$ m mit $2b = 4.4$ m und für $d = 1000$ m mit $2b = 13.8$ m.

Eine weitere Voraussetzung für spiegelnde Reflexionen elektromagnetischer Signale ist eine ausreichend geringe Rauigkeit der Oberfläche des Reflektors in Bezug auf die Wellenlänge des reflektierten Signals. Diese Bedingung wird mit dem Rayleigh-Kriterium erfüllt. Die Formel 6.4 ist eine qualitative Abschätzung, um feststellen zu können, ob eine spiegelnde Reflexion von einem Reflektor ausgehen kann. Ist das Kriterium erfüllt, spricht man auch von einer gerichteten Reflexion. Kleinere Flächen oder unregelmäßige Oberflächen, deren Rauigkeiten in der Größenordnung der Wellenlängen oder größer liegen, können diffuse (auch: ungerichtete) Reflexionen verursachen. Diffuse Reflexionen treten beispielsweise an Baumkronen oder an Grasland auf. Bei GPS-Messungen bewirken diffuse Reflexionen ein erhöhtes Signalrauschen.

$$\sigma_h < \frac{\lambda}{K \sin \Psi} \quad (6.4)$$

mit

σ_h	Standardabweichung der Höhen der Bodenunregelmäßigkeiten
λ	Wellenlänge
K	Multiplikationsfaktor [8...32]
Ψ	Komplementärwinkel des Einfallswinkels.

6.2.2 Auswirkung des Mehrwegeeffektes

Die Überlagerung eines direkten Signals mit einem Umwegsignal ergibt ein Mischsignal, das in der Antenne ein elektrisches Feld aufbaut. Der entstehende Messfehler in den Beobachtungen ist nach [Becker 1994] abhängig von:

- Material und Oberflächenbeschaffenheit des Reflektors,
- dem Sendesignal des Satelliten (Frequenz, Sendestärke),
- dem Einfallswinkel auf den Reflektor,
- dem Antennendiagramm des Empfängers (Richtcharakteristik der Antenne) und
- der Messtechnik des Empfängers.

Zusätzlich ist die Weglängendifferenz der indirekten Welle gegenüber der direkten Welle, gleichbedeutend mit der Zeitdifferenz des Eintreffens der beiden Signale im Empfänger, ein charakteristisches Maß für die Auswirkungen des Multipath.

Die Weglängendifferenz ist aus einfachen geometrischen Beziehungen zwischen Empfänger, Satellit und Reflektor ableitbar ([Becker 1994], [Blomenhofer 1996]). Bei vollständiger Abschirmung des direkten Signals wird bei einer ausreichenden Umwegsignalstärke eine Messung nur mit dem Umwegsignal durchgeführt. Die Überlagerung direkter und indirekter Signale bewirkt eine verfälschte Pseudostreckenmessung mit dem Mischsignal. Unter der hinreichenden Annahme, dass die GPS-Signale auf der Station und dem Reflektor parallel einfallen (siehe Abbildung 6.4), werden die Weglängendifferenzen aus den Gleichungen 6.5 und 6.6 berechnet. Es gilt für horizontale Reflektoren

$$\Delta d = 2h \cos \Psi \quad (6.5)$$

und für vertikale Reflektoren

$$\Delta d = d + d \cos \gamma \quad (6.6)$$

mit

Δd	Wegdifferenz,
h	Antennenhöhe über dem Reflektor und
Ψ	Einfallswinkels des Signals auf dem Reflektor
γ	Raumwinkel zwischen einfallendem und reflektiertem Signal am Reflektor.

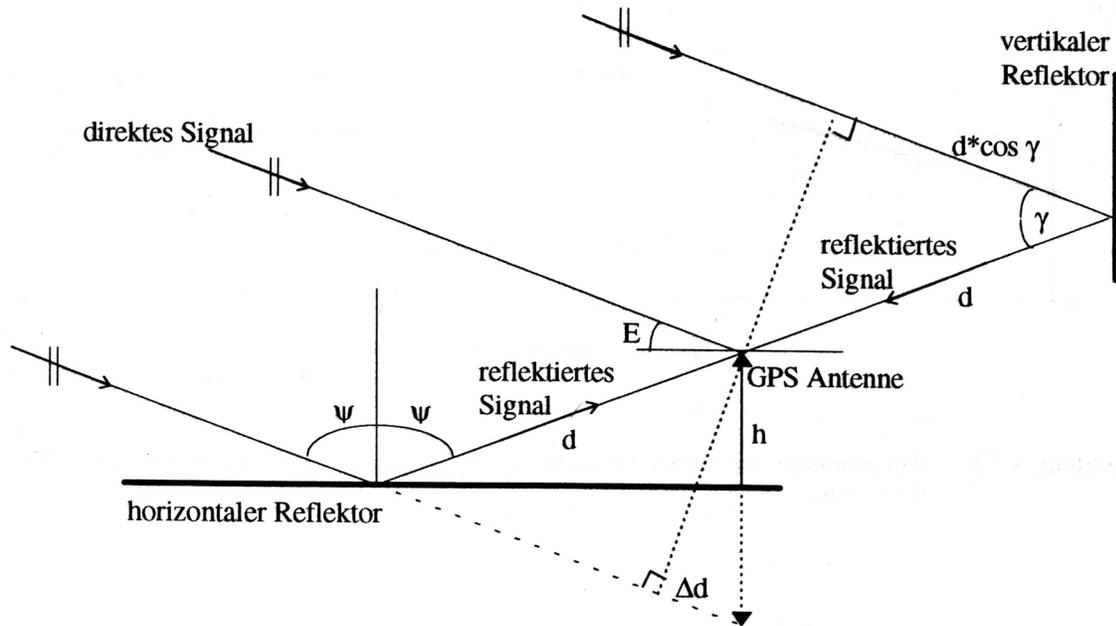


Abbildung 6.4: Das Prinzip der Mehrwegeausbreitung bei spiegelnder Reflexion [Blomenhofer 1996].

Aus der Wegdifferenz wird nach [Becker 1994] die Phasendifferenz Φ zwischen direktem und indirektem Signal über die Signalwellenlänge λ wie in Gleichung 6.7 berechnet.

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d \quad (6.7)$$

Die Auswirkung auf die Trägerphasen-Messgröße ergibt sich nach [Georgiadou und Kleusberg 1988] als resultierendes Signal mit der Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ zu

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{\sin \Phi}{\frac{1}{\alpha} + \cos \Phi}. \quad (6.8)$$

Der Reflexionsfaktor α des Reflektor ist ein Maß für das Leistungsverhältnis zwischen ausgedemtem und reflektiertem Signal. Er kann Werte zwischen $0 \leq \alpha \leq 1$ erreichen, wobei $\alpha \approx 1$ beispielsweise an einer glatten Wasseroberfläche auftreten kann.

[Georgiadou und Kleusberg 1988] geben an, dass maximal auftretende Fehler für Trägerphasenmessungen sich für

$$\Phi(\Delta\varphi_{max}) = \pm \arccos(-\alpha) \quad (6.9)$$

mit

$$\Delta\varphi_{max} = \pm \arcsin(\alpha) \quad (6.10)$$

berechnen lassen und somit nur abhängig von dem Reflexionskoeffizienten α sind. Theoretisch kann maximal mit $\alpha = 1$ und $\phi = 90^\circ$ für L1 mit einer Wellenlänge von 19.05 cm ein Fehler von 4.8 cm und für L2 mit der Wellenlänge 24.40 cm ein Fehler von 6.1 cm auftreten. Der Mehrwegeeffekt bei C/A-Codemessungen kann nach [Blomenhofer 1996] bis zu 50 m betragen.

Mit der Veränderung der Satellitengeometrie ändert sich auch die Weglängendifferenz δd beziehungsweise die Phasendifferenz Φ und verursacht eine zyklische Veränderung des Multipath

über die Zeit. Nach [Georgiadou und Kleusberg 1988] ergibt sich für die Frequenz des Multipath-Signals $f_{\Delta\varphi}$ die Formel 6.11 und bezogen auf einen horizontalen Reflektor die Formel 6.12.

$$f_{\Delta\varphi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.11)$$

Die Änderung der Weglängendifferenz δd ist bei einem ebenen Reflektor abhängig von der Neigung der Reflektorfläche (z.B. ausgedrückt durch die Richtung des Normalenvektors) und von der Änderung des Einfallswinkels des auf dem Reflektor einfallenden Satellitensignals. Für einen horizontalen Reflektor ergibt sich aus den Formeln 6.5, 6.7 und 6.11 über die Elevation δ des Satelliten:

$$f_{\Delta\varphi} = \frac{2h}{\lambda} \cdot \cos(\delta) \cdot \frac{d\delta}{dt}. \quad (6.12)$$

Für mittlere $\delta = 45^\circ$ ist $d\delta/dt \approx 0.07$ mrad/s für GPS-Satelliten. Daraus ergibt sich beispielsweise für Antennen, die 1.50 m über den Boden als Reflektor montiert sind, eine typische Wellenlänge von etwa 21 min für das Multipath-Signal. Für Antennen, die direkt mit Dreifuß auf einen potentiellen Reflektor geschraubt sind (z.B. $h = 0.20$ m), errechnet sich eine Wellenlänge von etwa 160 min.

6.2.3 Nachweis des Mehrwegeeffektes auf Trägerphasenmessungen

Auf kurzer Basis werden entfernungsabhängige Fehleranteile durch die Bildung der Doppeldifferenz der Beobachtungen weitgehend eliminiert. Es verbleiben die geringfügigen Hardwareverzögerungen und die Differenz der Mehrwegeeffekte zwischen den Stationen und den Satelliten in den Doppeldifferenz-Residuen. Derart lassen sich jedoch keine absoluten Informationen über den Multipath ableiten, sondern nur die Multipath-Differenzen zwischen Stationen und Satellitenpaaren. A priori Annahmen (z.B., dass Satelliten mit hohen Elevationen bei Verwendung von *choke ring*-Antennen keine Mehrwegeeffekte aufweisen), haben nur bedingt Gültigkeit und sind zur Ableitung absoluter Informationen unbrauchbar.

Desweiteren zeigen sich die Mehrwegeeffekte im Signal/Rausch-Verhältnis der Satellitenbeobachtungen. Die Stärke des Signals beginnt durch die Überlagerung des direkten mit dem indirekten Signal wellenförmig zu variieren. Die Variationen sind direkt in den Messwerten erkenntlich, müssen also nicht durch Differenzbildung sichtbar gemacht werden. Eine direkte, absolute Ableitung des Trägerphasenfehlers durch Multipath ist nicht möglich.

Zur Analyse der Veränderlichkeit der Mehrwegeeffekte können siderische Tagesdifferenzen der Doppeldifferenzen bzw. der S/N-Verhältnisse herangezogen werden. Dabei wird ausgenutzt, dass sich die Konstellation der Satelliten unter normalen Umständen etwa alle 23 Stunden 56 Minuten (86160 s) wiederholt. Die Umlaufzeiten können zwischen den Satelliten um 10 s bis 20 s pro Tag variieren. Unter der Voraussetzung, dass sich die Umgebung der Empfangsantenne nicht ändert, wiederholt sich die Multipathsituation nach einem siderischen Tag. Eine Veränderung der Umgebung, der Reflektoreigenschaften oder der Position der Antenne wird bei der Bildung der Tagesdifferenzen deutlich. Abbildung 6.5 und Abbildung 6.6 zeigen ein Beispiel für die siderische Wiederholbarkeit des Multipath in den Doppeldifferenzen und in den Signal/Rausch-Verhältnissen. Die Doppeldifferenzen sind geglättet und die Zeiten des zweiten Tages um 86155 s reduziert. Besonders gegen Anfang und Ende der Messungen sind Schwankungen um etwa ± 0.02 m zu erkennen, die in den siderischen Tagesdifferenzen deutlich reduziert werden. Die Standardabweichung

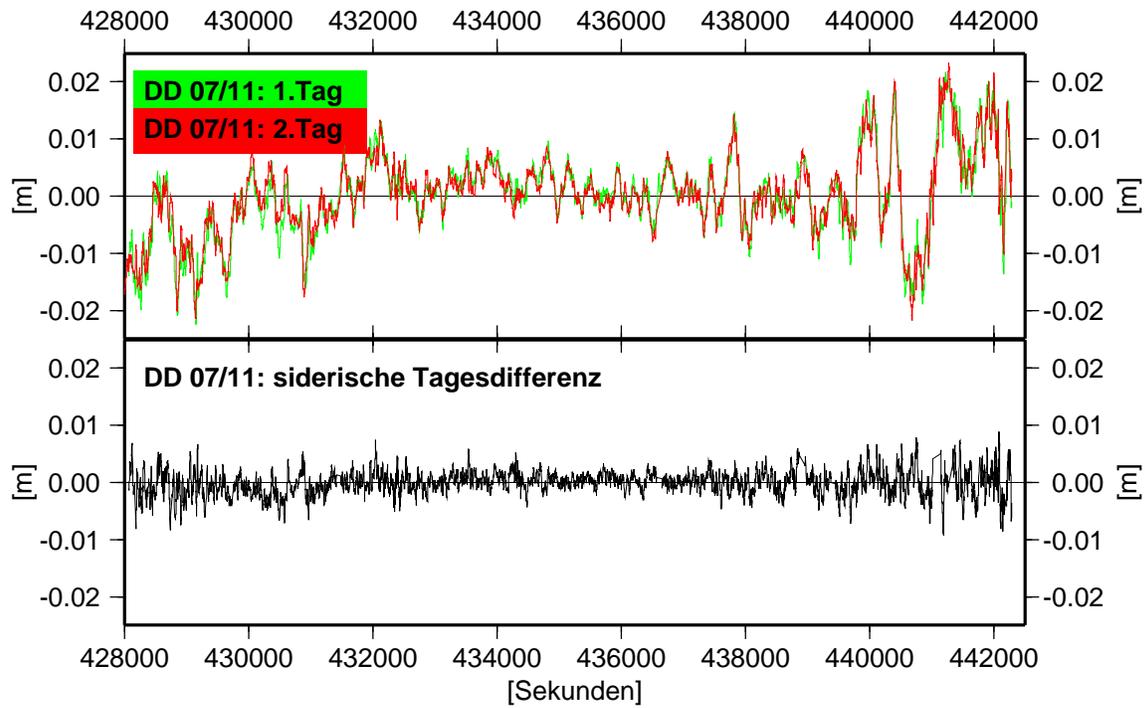
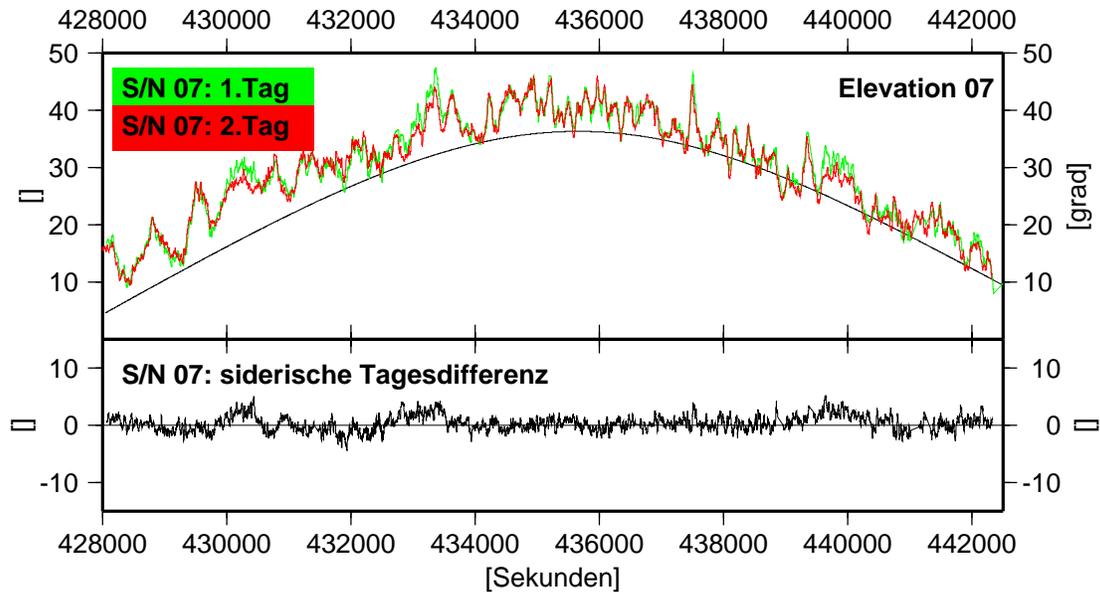
Abbildung 6.5: L_1 -Doppeldifferenzen zweier aufeinanderfolgender Tage und ihre Differenzen.

Abbildung 6.6: Signal/Rausch-Verhältnisse eines Satelliten zweier aufeinanderfolgender Tage und deren Differenzen.

chung der Einzelwerte der geglätteten Doppeldifferenzen betragen am ersten und am zweiten Tag 0.007 m, während die der siderischen Tagesdifferenzen 0.002 m beträgt.

In Abbildung 6.6 sind die Signal/Rausch-Verhältnisse des Satelliten 07 und die Differenz am darauffolgenden Tag zu denselben Zeiten wie in 6.5 dargestellt. Zusätzlich wird im oberen Teil der Grafik die Elevation des Satelliten gezeigt. Die S/N-Kurven sind mit der Elevationskurve hoch korreliert, es sind jedoch auch Schwankungen sichtbar, die in der siderischen Tagesdifferenz wiederum deutlich reduziert sind.

Variationen des Multipath auf Grund von Wetterbedingungen

Die Auswirkung des Multipath ist von der Amplitude (Leistung) des direkten und des indirekten Signals abhängig. Die Amplitude des indirekten Signals wiederum hängt von den Reflektoreigenschaften und damit vom Reflexionskoeffizienten α ab. Die Reflektoreigenschaften können durch Bedeckung mit Wasser, Eis oder Schnee verändert werden. Im Folgenden wird beispielhaft die Größenordnung der Variationen durch Wettereinwirkung anhand einer Messung abgeschätzt.

Auf dem Messdach des Instituts für Erdmessung wurde an mehreren aufeinander folgenden Tagen im Januar 2001 eine Basis bestehend aus zwei GPS-Antennen beobachtet (*Ashtech Geodetic II*, *Ashtech Marine B*). Zu Beginn der Messungen war die Umgebung anfangs mit mehreren Zentimetern Schnee bedeckt. Eine Warmwetterfront taute den Schnee innerhalb weniger Stunden in Schneematsch auf, der sich wiederum nach wenigen Stunden in abfließende und abtrocknende Nässe wandelte. Leichter Regen hielt die Umgebung zwei Tage lang vorwiegend nass. Am Tag 027 trocknete Sonnenschein den Boden und die umstehenden Gebäude vollständig ab. Einen Tag später setzte wieder Regen ein. Einen Überblick über den wetterbedingten Zustand der Umgebung gibt Tabelle 6.5.

Die Variationen des Multipath werden anhand geglätteter Doppeldifferenzen der Phasenmessungen auf L_1 analysiert. Abbildung 6.7 zeigt die Vergleiche ausgewählter Doppeldifferenzen. Die Standardabweichungen der geglätteten Doppeldifferenzen sind in der Tabelle 6.6 dargestellt.

Weisen die siderischen Tagesdifferenzen nur noch das Rauschniveau der Tagesdifferenzen von Phasenmessungen auf, kann davon ausgegangen werden, dass die Multipathverhältnisse korreliert sind. Dies wird in der Kombination (Nass-Trocken) deutlich erkennbar, aus den siderischen Tagesdifferenzen berechnen sich Standardabweichungen von 1.4 mm bis 2.1 mm. Bei der Kombination (Nass-Nass) sind die Ergebnisse etwas schlechter, da die Differenzen über fünf Tage gerechnet wurden.

Das Rauschniveau bei den Schnee-Kombinationen der Satelliten (20-29) und (07-11) ist demgegenüber mit >3 mm höher. Hier werden Unterschiede in den Multipathverhältnissen mit und ohne Schneedecke offenbar. Anders verhält es sich bei der Satellitenkombination (08-23). Hier wird das ursprüngliche Niveau erreicht, das sich bei der Kombination (Nass-Trocken) ergibt. In diesem Fall ist anzunehmen, dass der Reflektor nicht vom Schnee bedeckt war (z.B. eine Wand).

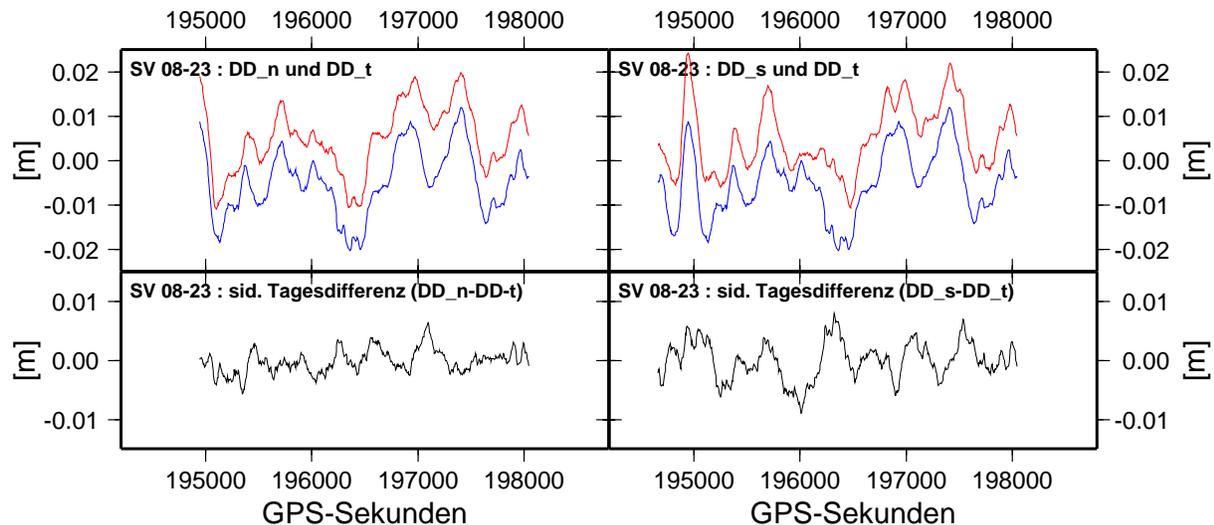
Die Beispiele zeigen, dass Nässe auf dem Messdach kaum Unterschiede des Multipath im Vergleich zu einer trockenen Umgebung hervorruft. Die Zustände (Nass-Trocken) und (Nass-Nass) unterscheiden sich nicht wesentlich. Eine Schneedecke scheint zur Dämpfung des Umwegsignals beizutragen, so dass die siderischen Tagesdifferenzen im Vergleich zu den (Nass-Trocken)-Kombinationen ein deutliches Signal zeigen.

Tag	0-4 Uhr	4-8 Uhr	8-12 Uhr	12-16 Uhr	16-20 Uhr	20-24 Uhr
022				Schnee		
023		Schnee		S-Matsch		nasser Boden
024				nasser Boden		
026			nasser Boden			trockener Boden
027		trockener Boden				nasser Boden

Tabelle 6.5: Überblick über den wetterbedingten Zustand der Umgebung.

Nass-Kombinationen					
	DD	Nass-Trocken		Nass-Nass	
20 - 29		3.2/3.1/1.8	(43.8%)	4.7/5.0/2.3	(51.1%)
07 - 11		4.7/4.5/1.4	(70.2%)	4.5/5.1/3.2	(28.9%)
08 - 23		7.5/7.5/2.1	(72.0%)	7.3/7.7/2.7	(63.0%)
Schneematsch-Kombinationen					
	DD	Matsch-Trocken		Matsch-Nass	
05 - 21		5.5/5.5/3.9	(29.1%)	5.5/5.8/3.0	(45.5%)
07 - 26		3.9/3.7/2.5	(35.9%)	5.6/4.6/3.2	(42.9%)
09 - 29		2.5/2.2/2.6	(-4.0%)	7.1/7.1/3.0	(42.3%)
Schnee-Kombinationen					
	DD	Schnee-Trocken		Schnee-Nass	
20 - 29		3.9/3.1/3.5	(10.3%)	5.7/4.7/3.0	(47.3%)
07 - 11		4.5/4.5/3.5	(22.2%)	4.5/4.4/3.3	(26.7%)
08 - 23		7.5/7.5/3.2	(57.3%)	7.1/7.3/2.7	(62.0%)

Tabelle 6.6: Standardabweichungen ausgewählter Doppeldifferenzen zur Untersuchung der Wetterabhängigkeit des Multipath. Standardabweichungen (Zustand1/Zustand2/siderische Tagesdifferenz) in [mm], Verhältnis (Zustand1-sid. Tagesdifferenz) in [%].

Abbildung 6.7: Doppeldifferenzen und siderische Tagesdifferenzen der Doppeldifferenzen (DD) der Satellitenkombination SV08-23. Links: Vergleich Zustand Trocken (DD_t) mit Zustand Nass (DD_n). Rechts: Vergleich Zustand Schnee (DD_s) mit Zustand Trocken (DD_t). Grafiken oben sind zur besseren Vergleichbarkeit um je ± 5 mm versetzt.

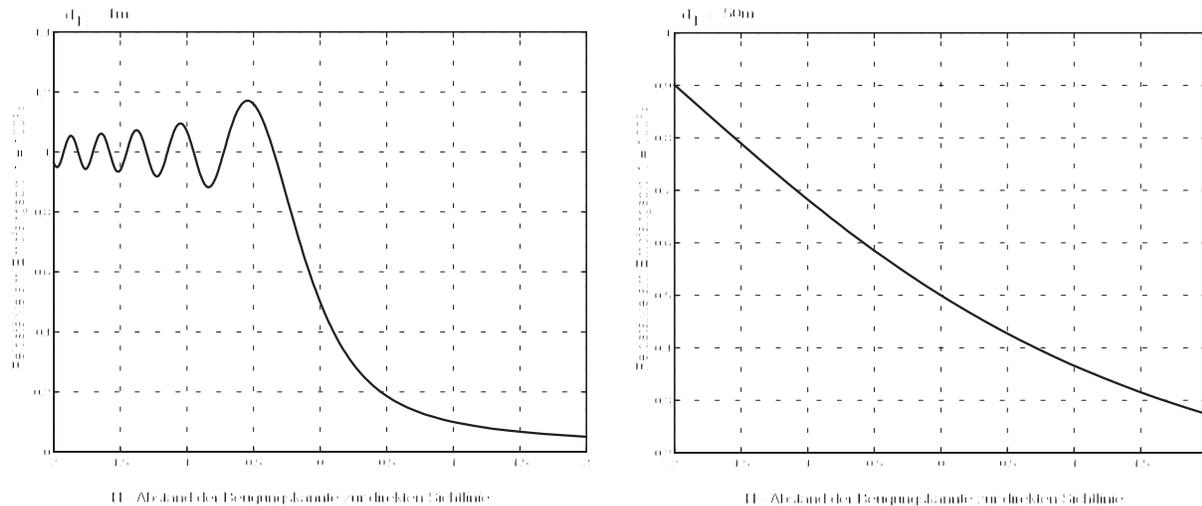


Abbildung 6.8: Zusammenhang zwischen empfangener Feldstärke E und Abstand einer Beugungskante von der direkten Sichtverbindung H für 50 m und 1 m Entfernung des Empfängers zur Beugungskante d_E nach [Bachmann 2001].

6.2.4 Diffraktion

Bei der Beugung (Diffraktion) wird ein elektromagnetisches Signal an einer Kante gebrochen und kann im Schatten eines Hindernisses empfangen werden. Dies ist der Fall für jedes Hindernis, das in die Fresnelzone eines Signals hineinragt.

In Abbildung 6.8 werden die Empfangsfeldstärken eines gebeugten GPS-Signals exemplarisch für die Entfernungen $d_E = 50\text{ m}$ und $d_E = 1\text{ m}$ zwischen Empfänger und wirksamer Beugungskante dargestellt. Das Formelwerk hierzu kann [Meinke und Gundlach 1992] entnommen werden.

Der Abstand H ist negativ, solange eine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger besteht. Aus der Abbildung 6.8 wird ersichtlich, dass ein oszillierender Einfluss auf die Feldstärke bereits kurz vor Eintritt in den Beugungsschatten ($H > 0$) wirkt. Je dichter die Kante am Empfänger ist, desto eher ist mit einem fast linearem Abfall der Empfangsstärke zu rechnen. Die Oszillationen entstehen durch die partiellen Abschattungen der Fresnelzone. Werden mehr abschwächende (negativ) elektromagnetische Felder als stärkende (positiv) Felder abgedeckt, wird das Signal stärker empfangen als bei der Freiraumausbreitung. Ist H positiv, so befindet sich der Empfänger im Beugungsschatten. Die Empfangsfeldstärke nimmt dann monoton ab und geht gegen Null.

Die Stärke eines empfangenen GPS-Satellitensignals kann anhand der Signalrauschverhältnisse beurteilt werden. Der Verlauf des Signalrauschverhältnisses verhält sich bei dem Verschwinden des Satelliten hinter einem Hindernis ähnlich wie die Empfangsleistungsverhältnisse in Abbildung 6.8.

Bei GPS-Messungen kann ein durch Beugungserscheinungen auftretender Empfang eines Satellitensignals in einer geometrischen Schattenzone Fehler von einigen Zentimetern bis hin zu einem Dezimeter hervorrufen [Wanninger et al. 2000].

6.2.5 Entgegenwirkende Maßnahmen

Die Mehrwegeeffekte und die Diffraktion lassen sich durch differentielle Messungen oder durch Linearkombinationen weder beseitigen oder vermindern. Die naheliegendste und wirksamste Bekämpfungsmethode gegen Einflüsse der Mehrwegeausbreitung ist deren Vermeidung durch

- eine geeignete Stationsauswahl. Dabei wird die Umgebung von potentiellen Reflexionsflächen in Stationsnähe vermieden.
- die Veränderung der Reflektoreigenschaften. Potentielle Reflektoren können mit Absorptionslacken behandelt oder mit Hochfrequenzmatten abgedeckt werden.

Oftmals müssen hierbei Kompromisse eingegangen werden, da bei der Auswahl von Referenzstationen zumeist logistische Gesichtspunkte die Nähe von Gebäuden fordern. Die Nutzung von Absorptionslacken und Hochfrequenzmatten ist üblicherweise sehr kostspielig und kaum vollständig durchführbar. Empfängerseitig können die Effekte reduziert werden durch

- die Verbesserung der Empfängermetstechnik. Statt der üblichen Korrelationslängen von $T/2$ werden bei dem *narrow spacing correlator* Längen von $0.5 - 0.01T$ verwendet. In kinematischen Anwendungen sind hierdurch vermehrt Phasensprünge zu erwarten. Als weitere Entwicklungen sind die *multipath estimating delay lock loop* und der *strobe and edge correlator* zu nennen.
- die Verbesserung der Antennentechnik. Geeignete Konstruktionsmerkmale zur Abschirmung der Signale sind große Grundplatten und konzentrische Metallstreifen (*choke ring*) knapp unterhalb der Phasenzentren. Auch kann das Antennendesign auf rechtsdrehend polarisierte Signale abgestimmt werden, da die einfach reflektierten Signale linksdrehend sind.

Die Veränderung des Antennendesigns führt zumeist dazu, dass die Antennen schwer und unhandlich werden. Für Anwendungen, die das schnelle Besetzen von Punkten durch einen Beobachter oder die Anbringung an einer kleinen Montierung erfordern, ist dies wenig praktikabel und zum Teil auch unwirtschaftlich. Bei statischen Punktbestimmungen kann die Auswirkung auf die Koordinatengenauigkeit zudem durch Mehrfachbesetzung nach etwa 30 min oder auch lange Beobachtungszeiten von 30 min oder 1 h Dauer vermindert werden. Dem stehen ebenfalls im wesentlichen wirtschaftliche Gesichtspunkte entgegen.

Im folgenden Kapitel 6.3 wird ein neu entwickeltes Verfahren beschrieben, mit dem verbleibende Resteffekte des Multipath auf GPS-Stationen kalibriert und in Echtzeit an die Messungen als Korrekturwerte angebracht werden. Dieses Verfahren eignet sich in der Hauptsache für die Kalibrierung von permanenten Referenzstationen.

6.3 Das Hannoversche Verfahren zur Absoluten Stationskalibrierung

Eine wesentliche Voraussetzung für das am Institut für Erdmessung mit der Geo++[®] entwickelte Verfahren zur Absoluten Kalibrierung von Trägerphasen-Multipath [Böder et al. 2001] ist die Kenntnis der absoluten PCV der für den Kalibriervorgang eingesetzten Antennen (siehe Kapitel 6.1). Die zu kalibrierende Referenzstation muss ihren Betrieb nicht unterbrechen. Für die Kalibrierung wird eine zweite GPS-Antenne auf einem Roboterarm (siehe Kapitel 6.3.1) in unmittelbarer Nähe der Station betrieben. Das Verfahren wird im Folgenden anhand der Schritte

- Dekorrelation des Multipath auf der Roboterstation
- Bildung von Stationsdifferenzen
- Modellierung und Anbringung der Korrektur

beschrieben.

6.3.1 Roboterarme am Institut für Erdmessung

Für die Entwicklung und Erprobung der Verfahren zur Absoluten Feldkalibrierung der PCV und des Multipath stehen am Institut für Erdmessung zwei Roboterarme zur Verfügung, die speziell für die Anwendungen konfiguriert wurden. Hersteller ist die Firma *amtec* in Berlin. Entscheidend für die Auswahl der Arme war der modulare Aufbau, die zugesicherte permanente Einsetzbarkeit im Freien und die hohe Präzision. Zusätzlich sollen die Arme vergleichsweise leicht zu transportieren sein. Die Arme sind weitestgehend identisch aufgebaut.

Die Roboter bestehen aus jeweils fünf einachsigen Drehmodulen (*Rotary-Power-Cubes*). Ein Roboterarm ist in Abbildung 6.9 dargestellt. Ein einzelnes Drehmodul ist zusammengesetzt aus zwei gleich großen Würfeln (Kantenlängen der Würfel: 110 mm, 90 mm bzw. 70 mm) und wird mit einem Gleichstrommotor betrieben. Die Lageerfassung wird über einen Inkrementalgeber mit 888 Inkrementen pro Grad durchgeführt. Die Wiederholgenauigkeit der Positionierung ist laut Herstellerangaben mit $\pm 0.02^\circ$ angegeben. Mitsamt den Zwischenstücken ist der Arm insgesamt etwa 70 cm lang. Die Wiederholgenauigkeit eines Punktes, der über diese Armlänge mit den angegebenen Genauigkeit eingestellt wird, kann mit etwa 0.2 mm abgeschätzt werden. Durch Fertigungstoleranzen in der Zentrierung und Orientierung bei dem Zusammenbau der Module und durch Systematiken in Abhängigkeit von den wirkenden Drehmomenten sind jedoch Abweichungen von bis zu 3 mm von der errechneten Position sichtbar geworden. Infolgedessen werden die Arme regelmäßig mit einem Tachymeter-Messsystem (TMS) kalibriert. Die Punktgenauigkeit der TMS-Messungen ist mit 0.1 mm anzunehmen. Ein Teil der Parameter (Armlängen, Winkeloffsets) wird sofort bei der Punkteinstellung in der Roboterarm-Steuerungssoftware angebracht, mit den weiteren Parametern werden die GPS-Messungen auf einen nominellen Punkt zentriert.

Die Genauigkeit der Modellierung über Zentrierung, Armlängen und Winkeloffsets und über gewichtsabhängige Parameter ist mit besser als 0.3 mm ausreichend für die absolute Antennen- und Multipath-Kalibrierung.



Abbildung 6.9: Roboterarm zur Absoluten Antennen- und Stationskalibrierung.

6.3.2 Dekorrelation des Multipath auf der Roboterstation

Die Translation einer Empfangsantenne in Bezug auf einen Multipath-Reflektor bewirkt eine Änderung der Phase der Trägerphasenbeobachtung. Die Beziehungen sind aus den Gleichungen 6.5 bis 6.8 abzuleiten. In Abbildung 6.10 wird die Veränderung der vom Multipath überlagerten Phasenmessung an verschiedenen Bewegungen der Antenne relativ zu dem Reflektor dargestellt.

Der obere Graph in Abbildung 6.10 zeigt den Multipath für das L1-Signal simuliert mit einem etwa 20 m entfernten Reflektor. Der vertikal stehende Reflektor ist mit einem Reflexionskoeffizienten von $\alpha = 0.75$ angenommen worden, der Satellit steigt über einen Bogen von 10° -Länge in niederen Elevationen langsam auf. Das Messrauschen der Trägerphase wird vernachlässigt. Die Werte erreichen Größenordnungen von ± 2.6 cm bei Periodenlängen von etwa 380 s bis 180 s. Bewegt man die Antenne langsam linear mit einer Geschwindigkeit von 1 cm/s auf den Reflektor zu, dann erhöht sich die Frequenz des resultierenden Multipath-Signals (Periodenlänge ca. 10 s), während die Amplitude sich nicht verändert (siehe mittlerer Graph). Im unteren Graph wird dasselbe Signal mit quasi zufällig angefahrenen Positionen auf einem Roboterarm mit einer wirksamen Armlänge von hier etwa 50 cm abgetastet. Die Amplitude bleibt mit ± 2.6 cm gleich. Das Signal ist jedoch "verrauscht", so dass deterministische und stochastische Anteile nicht zu trennen sind.

Der Nachweis anhand realer Messungen gelingt mit einem Aufbau bestehend aus zwei Roboterarmen, die sich quasi zufällig unabhängig voneinander bewegen. Die Modulparameter (siehe Kapitel 6.3.1) werden derart berechnet, dass die neu eingestellte Position der Antenne um mindestens eine Wellenlänge der Trägerphasen (also > 25 cm) von der vorhergehenden entfernt ist. Gleichzeitig ist die Antenne zur Messepoche nach geographisch Nord orientiert und im lokal geo-

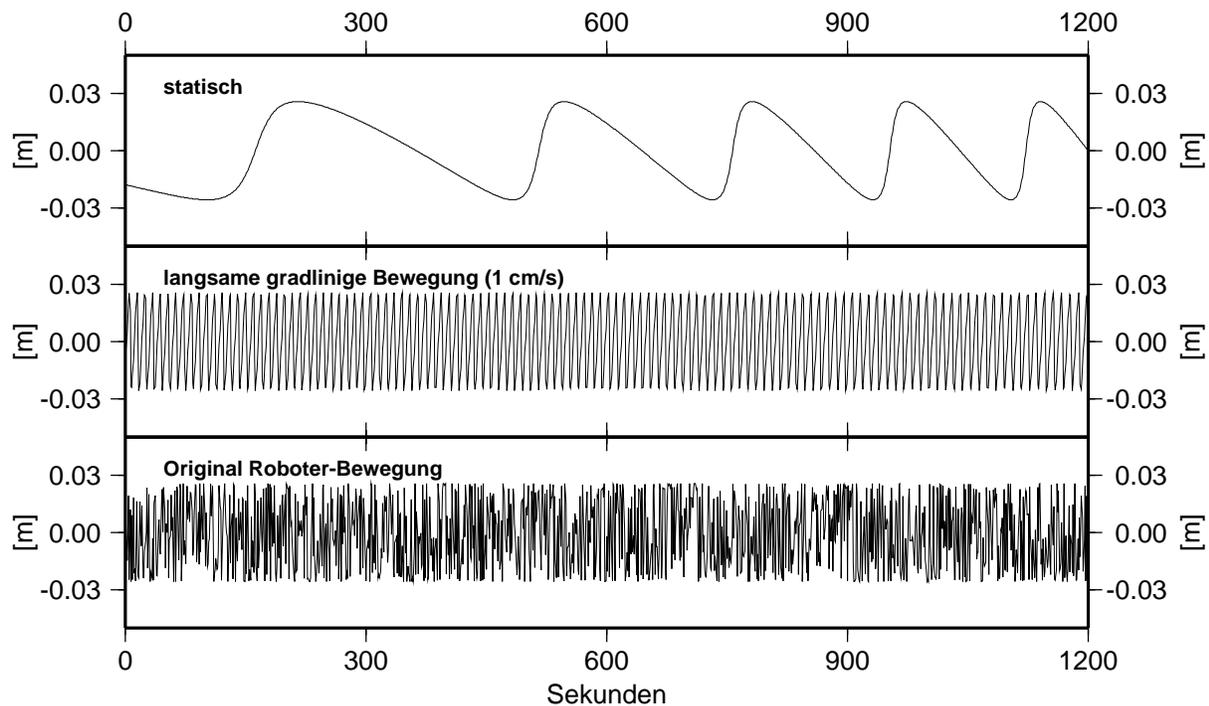


Abbildung 6.10: Simulation zur Dekorrelation des Multipath durch Bewegung der Empfangsantenne.

dätischen System horizontalisiert. Die Berechnungen der Modulpositionen werden vor der Messung mit der Software *calpmupa* vorgenommen.

Die Messungen wurden Ende des Jahres 2000 durchgeführt. Auf den Roboterarmen waren jeweils *choke ring* Antennen vom Typ *Ashtech* montiert. Um die Variationen anhand der siderischen Wiederholbarkeit des Multipath (siehe Kapitel 6.2.2) beurteilen zu können, wurde an zwei aufeinanderfolgenden Tagen zunächst statisch (Tag 320) und dann mit bewegten Antennen (Tag 321) gemessen. Die Abbildung 6.11 zeigt im oberen Graphen die L1-Doppeldifferenzen zwischen den Satelliten 06 und 10 am statischen Tag. Anfänglich ist ein nur wenig von Multipath beeinflusstes Signal zu erkennen, das ab der Tagessekunde 331200 des Tages 320 systematische Effekte mit einer Periodenlänge von etwa 850 s und einer Amplitude bis ± 1.5 cm erreicht. Bei Bewegung beider Antennen am Tag 321 wiederholt sich der systematische Einfluss des Multipath nicht, jedoch ist das Rauschniveau der Phasenmessungen deutlich erhöht. In Tabelle 6.7 sind die Standardabweichungen ausgewählter Doppeldifferenzen zusammengestellt. Es wird ersichtlich, dass sich das Rauschniveau an den beiden Tagen nur unwesentlich ändert. Die Reduzierung der systematischen Effekte kann aber durch die Berechnung des gleitenden Mittels über 60 s gezeigt werden.

Die Dekorrelation des Multipath wird ebenfalls bei der Betrachtung der siderischen Tagesdifferenzen der Signal/Rausch-Verhältnisse in Abbildung 6.12 deutlich. Dargestellt sind beispielhaft die Tagesdifferenzen der Tage 320 und 321 des Satelliten 10 auf einer Roboterstation (robo) und auf einem fest installiertem Punkt (1000). Die Tagesdifferenz der fest installierten Antenne (1000) weicht nur geringfügig von Null ab, während das S/N der unbewegten Roboterstation (Tag 320) um bis zu 10 dB gegenüber der bewegten Station am Tag 321 in einem Raum von etwa ± 50 cm variiert. Es wurde gezeigt, dass der Multipath einer Empfangsantenne auf einem quasi zufällig und schnell bewegten Roboterarm dekorreliert werden kann.

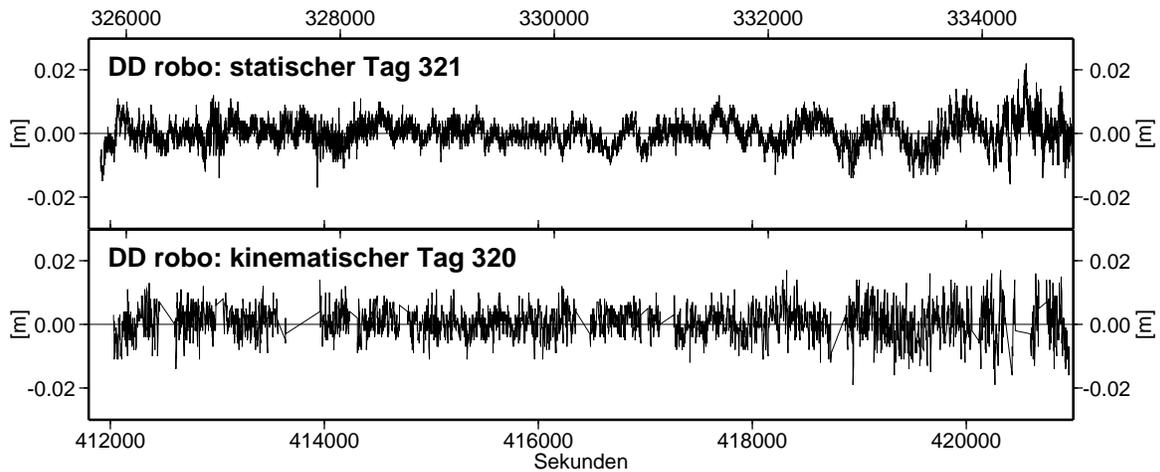


Abbildung 6.11: Beispiel für die Dekorrelation des Multipath durch schnelle Roboter-Bewegungen. Doppeldifferenzen zwischen den Satelliten 06 und 10 auf den Roboterstationen an den Tagen 320 (statisch) und 321 (kinematisch).

		sv02-11	sv03-19	sv06-10	sv19-31
statisch [mm]	(1)	5.2	5.4	4.3	6.3
kinematisch [mm]	(2)	4.9	5.0	4.9	6.1
kinematisch [mm] *)	(3)	2.8	2.5	2.0	2.8
Reduzierung (1/3)	(4)	46.2 %	53.7 %	53.5 %	55.6 %

*): gleitendes Mittel über 60 Sekunden

Tabelle 6.7: Standardabweichungen der Residuen ausgewählter Kombinationen von Doppeldifferenzen auf den Roboterstationen an den Tagen 320 (statisch) und 321 (kinematisch) in [mm] und die Multipath/Rausch-Reduzierung durch die Bewegung der Roboterarme in [%].

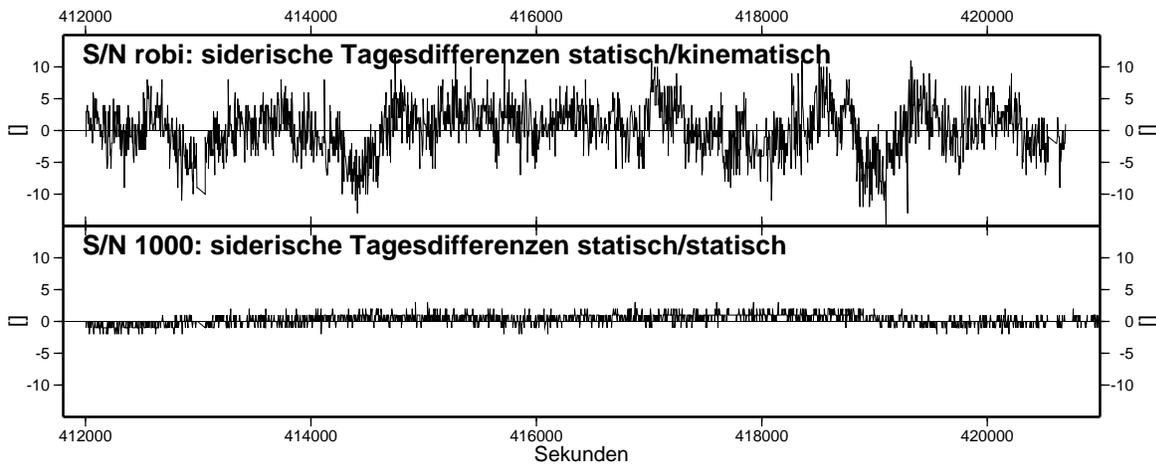


Abbildung 6.12: Beispiel für die Dekorrelation des Multipath durch schnelle Roboter-Bewegungen. Tagesdifferenzen des Satelliten 10 auf der Roboterstation *robo* an den Tagen 320 (statisch) und 321 (kinematisch) und auf einer fest installierten, unbewegten Station (1000).

6.3.3 Modellierung und Anbringung der Korrektur

Ausgehend von der Gleichung 3.1 und den Betrachtungen in Kapitel 3.2 ergibt sich für die Differenz $SD_{f,K-R}^j$ der Trägerphasenmessungen zweier Stationen K und R zu einem Satelliten j bei bekannten absoluten PCV und Koordinaten, bestimmten Mehrdeutigkeiten und Empfängergerührfehlern und vernachlässigbaren entfernungsabhängigen Fehlereinflüssen die nachfolgend angegebene Gleichung:

$$SD_{f,K-R}^j = \delta m_{f,K}^j - \delta m_{f,R}^j + \epsilon_{f,K-R}^j. \quad (6.13)$$

Der zufällige Messfehler einer Stationsdifferenz $\epsilon_{f,K-R}^j$ steigt entsprechend dem Fehlerfortpflanzungsgesetz an. Der Einfluss der Mehrwegeausbreitungen an der Empfängerantenne $\delta m_{f,i}^j$ kann seinen Eigenschaften gemäß mit Korrelationslängen τ von 60 s bis 30 min modelliert werden. Demzufolge kann für das stochastische Modell der zu kalibrierenden Station K formuliert werden:

$$\delta m_{f,K}^j = f(\sigma_{MP(kin)}^2, \tau). \quad (6.14)$$

Wird als Station R die bewegte Roboterstation eingeführt, auf der zu jeder Epoche auf einer quasi zufälligen Position gemessen wird, dann wird die Korrelationslänge auf dieser Station zu Null ($\tau = 0$). Der systematische Effekt des Multipath auf der Station R kann als höheres Rauschen in der Stationsdifferenz interpretiert werden. Das stochastische Modell kann daher in Abhängigkeit der Amplitude des Multipathsignals mit einer höheren Varianz $\sigma_{MP(kin)}^2$ wie folgt beschrieben werden:

$$\delta m_{f,R}^j = f(\sigma_{MP(kin)}^2, \tau = 0) = \epsilon_{f,MP(kin)}^j. \quad (6.15)$$

Die Messfehler lassen sich nach dem allgemeinen Fehlerfortpflanzungsgesetz [Pelzer 1985] hier ohne Berücksichtigung möglicher Korrelationen wie Varianzen ableiten.

$$(\epsilon_{f,SD_{MP}}^j)^2 = (\epsilon_{f,K-R}^j)^2 + (\epsilon_{f,MP(kin)}^j)^2. \quad (6.16)$$

Die Stationsdifferenz zwischen einer festen und einer zufällig bewegten Station ergibt sich unter Berücksichtigung des höheren Messrauschens bedingt durch die Dekorrelation des Multipath zu

$$SD_{f,K-R}^j = \delta m_{f,K}^j + \epsilon_{f,SD_{MP}}^j. \quad (6.17)$$

Die derart gewonnene Stationsdifferenz ist die direkte Messgröße für die Multipath-Korrektur auf der festen Referenzstation. Eine Simulation der Messgröße wird in Abbildung 6.13 gezeigt. Das Ergebnis ist aus der Überlagerung der Einzelsignale in Abbildung 6.10 gewonnen: das statische Multipath-Signal wird zu dem Multipath-Signal der Original-Roboterbewegung addiert.

Die Messgrößen werden mit einer Kugelfunktionsentwicklung mit Grad und Ordnung 20 über die gesamte Antennenhemisphäre über Azimut und Elevation des einfallenden direkten Signals modelliert. Ein beispielhaftes Ergebnis der Modellierung wird in Abbildung 6.14 dargestellt. In dem *sky plot* werden Azimute und Elevationen von kalibrierten Satellitenbahnen eines mehrstündigen Beobachtungsfensters gezeigt. Sie erscheinen in der Abbildung als glatte Trajektorien. Orthogonal zu diesen Trajektorien sind die Multipath-Korrekturen aufgetragen.

Die Korrekturen werden ähnlich wie die Antennen-PCV zur Reduzierung von Phasenbeobachtungen herangezogen. Hierzu muss die Auflösung der Korrekturdateien erweitert werden. Für Antennenkorrekturen ist eine Auflösung in einem 5°-Gitter über Azimut und Elevation hinreichend. Rechnet man mit einer Winkelgeschwindigkeit von näherungsweise 0.5°/min für einen GPS-Satelliten in Bezug zum Beobachter und sollen 2 Korrekturen pro Multipath-Schwingung

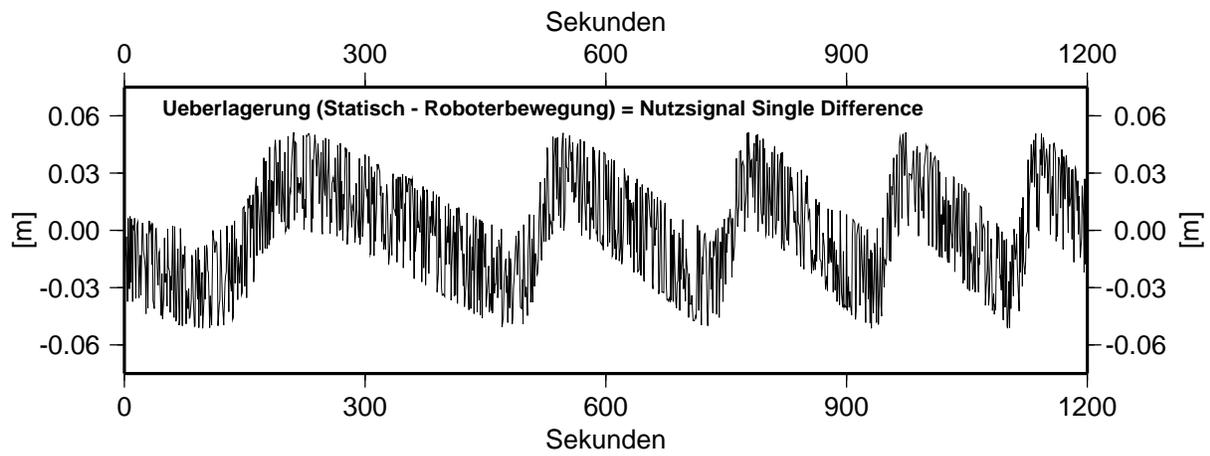


Abbildung 6.13: Simulation der Stationsdifferenz einer Multipath-dekorrelierten Station mit einer Referenzstation. Ableitung aus 6.10.

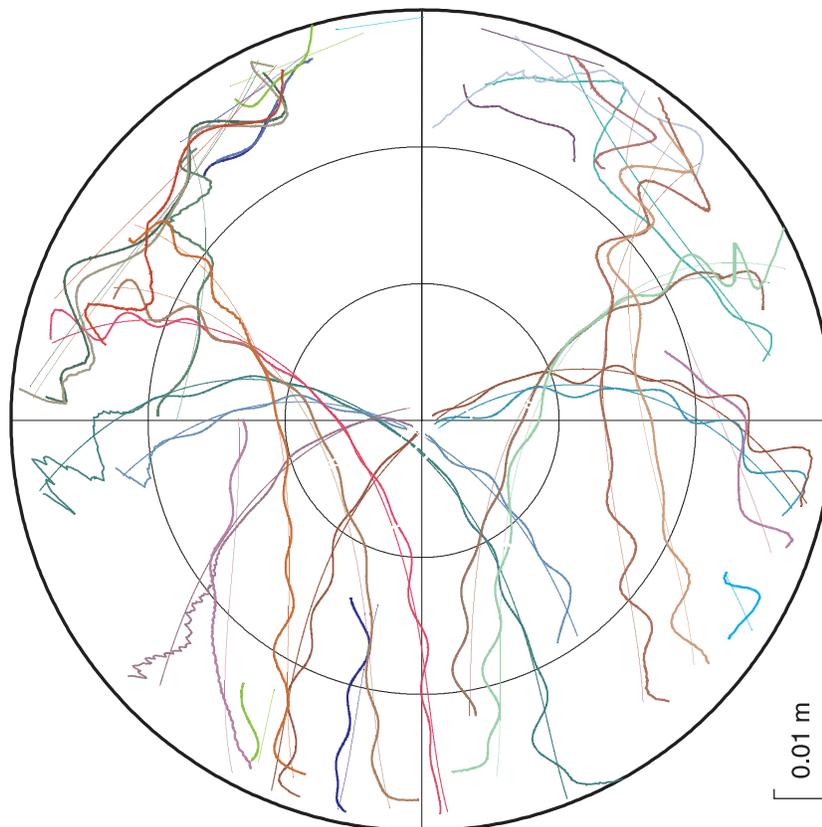


Abbildung 6.14: Darstellung der Multipath-Korrekturen über Azimut und Elevation in einem *sky plot*.

angegeben werden, dann ergibt dies bei einem 5° -Gitter eine maximal aufzulösende Periodenlänge von 20 min. Sollen minimal 60 s-Wellen aufgelöst werden, so ist eine Gitterweite von 0.25° bei Angabe der Korrekturen notwendig. Für eine vollständige GPS-Stationskalibrierung ist mindestens eine 24-h-Messung notwendig, um alle Satellitenbahnen nutzen zu können. Für andere Navigationssysteme können auch längere Kalibrierungszeiten in Abhängigkeit einer ausreichenden Überdeckung der Hemisphäre notwendig werden.

6.3.4 Untersuchungsergebnisse

Für Untersuchungszwecke wurde die Kalibrierung mit zwei Roboterarmen, ausgestattet mit *Ash-tech choke ring*-Antennen, für eine Referenzstation (*JAVAD dual depth choke ring*-Antenne) durchgeführt. Die Elevationsmaske betrug 0° . Die absoluten PCV der Empfängerantennen wurden in Echtzeit angebracht und sind somit eliminiert. Die Messungen fanden im November 2000 zeitgleich mit den im Abschnitt 6.3.2 beschriebenen Untersuchungen statt. Die Kalibrierung erfolgte im Postprocessing anhand der oben beschriebenen Prozedur mit einer Kugelfunktionsentwicklung mit Grad und Ordnung 20.

Die Abbildung 6.15 zeigt in der oberen Grafik die Doppeldifferenzen zwischen den Satelliten 06 und 10 auf der Roboterstation und auf der zu kalibrierenden Station 1000. Anfänglich ist ein wenig verrauschtes Signal mit nur leichten Schwingungen im Bereich von wenigen Millimetern zu erkennen. Ab etwa GPS-Sekunde 417000 verstärkt sich diese Schwingung bis auf eine Amplitude von etwa ± 1.5 cm. Da die Roboterstation durch die Bewegung keine systematischen Mehrwegeinflüsse aufweist, ist dies das Signal, das aus der Differenz der Einflüsse der beiden Satelliten auf der Station 1000 entstanden ist. Nach Auswertung der Kalibrierung wurden die Einfachdifferenzen zwischen den Korrekturen berechnet. Sie stellen in der oberen Grafik der Abbildung 6.15 eine glättende Kurve dar. In der unteren Grafik sind die Doppeldifferenzen der Satelliten nach der Kalibrierung zu sehen. Eine systematische Schwingung ist nicht mehr zu erkennen.

Die Reduzierung der stationsabhängigen Fehlereinflüsse kann anhand der Standardabweichungen der Doppeldifferenzen deutlich gemacht werden. Tabelle 6.8 zeigt eine Auswahl der Doppeldifferenzen zwischen vier Satellitenpaaren auf der Roboterstation *robo* und der zu kalibrierenden Station 1000. Die Reduzierung der Standardabweichungen um 60% bis 70% für die ausgewählten Doppeldifferenzen zeigt, dass systematische Effekte reduziert werden. Ein ähnliches Ergebnis ergibt ein Vergleich der Koordinaten der Station 1000, die im Postprocessing einmal mit und einmal ohne Kalibrierung mit der Roboterstation *robo* als Referenz berechnet wurden.

Die Ergebnisse in Tabelle 6.9 und Abbildung 6.16 zeigen eine Verbesserung von 40% bis 60% auf einem Niveau von 1 mm für die Lagekomponenten und 2 mm für die Höhenkomponente mit der L_1 -Positionsbestimmung durch die Kalibrierung der Station 1000. Für die Positionsbestimmung mit dem ionosphärenfreien, aber stärker rauschenden L_0 -Messsignal werden 40% bis 50% Rauschreduzierung auf ein Niveau von etwa 3 mm für die Lagekomponenten und 7 mm in der Höhe erreicht.

6.3.5 Zukünftige Weiterentwicklung des Verfahrens

Die Modellierung des Stationskalibrierung über Kugelfunktionsentwicklungen wird für Stationen mit hohen Frequenzen des Multipath (ferne Reflektoren) nur mit großem Zeit- und Rechenaufwand durchgeführt werden können. Die Algorithmen müssen diesen Gegebenheiten angepasst werden, zum Beispiel durch eine polynomiale Zerlegung einzelner Bahnabschnitte. Die Informationen der Kreuzungspunkte der Bahnen verschiedener Satelliten können als Bedingung in eine

		sv02-11	sv03-19	sv06-10	sv19-31
unkorrigiert [mm]	(1)	6.9	6.9	6.7	8.2
korrigiert [mm]	(2)	5.2	5.6	5.2	7.2
korrigiert [mm] *)	(3)	2.1	2.5	1.9	3.2
Reduzierung (1/3)	(4)	69.6 %	63.8 %	71.6 %	61.0 %

*): gleitendes Mittel über 60 Sekunden

Tabelle 6.8: Standardabweichungen der Residuen ausgewählter Kombinationen von Doppeldifferenzen auf der Roboterstation *robo* und der Station 1000 am Tag 321 in [mm] und die Multipath/Rausch-Reduzierung durch die Kalibrierung der Station 1000 in [%].

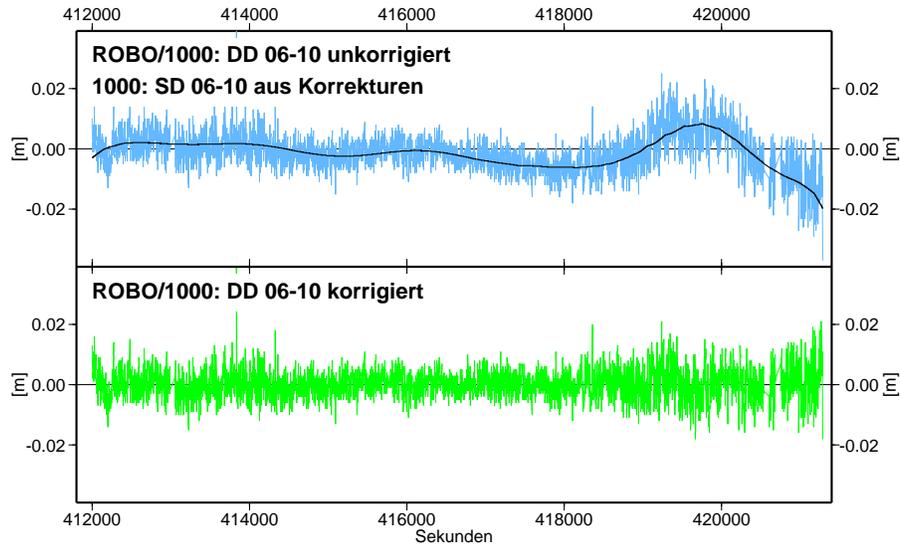


Abbildung 6.15: Oben: Doppeldifferenzen (DD) zwischen den Satelliten 06 und 10 auf der Roboterstation *robo* und der Station 1000 am Tag 321. Glatte Kurve: Einfachdifferenzen (SD) zwischen den Korrekturen der Satelliten 06 und 10. Unten: DD zwischen den Satelliten 06 und 10 auf der Roboterstation *robo* und der mit Kalibrierwerten versehenen Station 1000 am Tag 321.

		L_1			L_0		
		Nord	Ost	Höhe	Nord	Ost	Höhe
unkorrigiert [mm]	(1)	2.44	1.93	4.29	6.25	5.70	11.44
korrigiert [mm]	(2)	1.10	0.99	1.87	3.61	3.03	6.73
Reduzierung (1/2)	(3)	54.9 %	48.7 %	56.4 %	42.2	46.8	41.2

Tabelle 6.9: Standardabweichungen der Koordinaten der Station 1000 mit und ohne Kalibrierung am Tag 321 in [mm] und die Multipath/Rausch-Reduzierung durch die Kalibrierung der Station 1000 in [%].

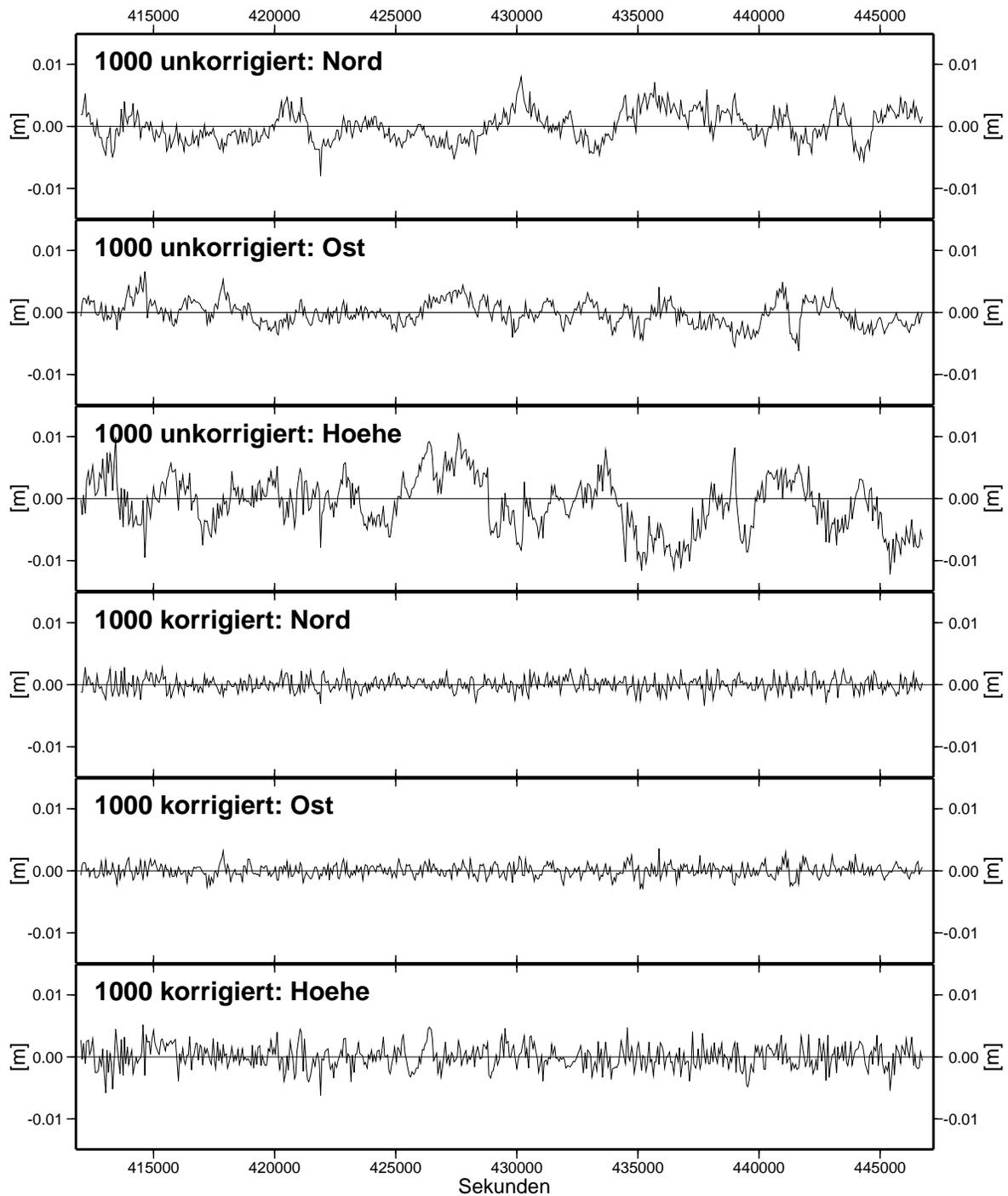


Abbildung 6.16: Koordinatendifferenzen L_1 zum Soll ohne und mit Stationskalibrierung. Koordinatenbestimmung mit Referenzstation *robo* am Tag 321. Obere Grafiken: ohne Kalibrierung. Untere Grafiken: mit Kalibrierung.

Ausgleichung eingebracht werden. Eine weitere Verbesserung des Verfahrens kann voraussichtlich über die Nutzung eines gemeinsamen Frequenzgebers für die Empfänger am Roboterarm und an der zu kalibrierenden Station erreicht werden.

Informationen über mögliche Reflektoren können zur Stützung des Kalibrierungsprozesses eingeführt werden. Die Einmessung kann über photogrammetrische und tachymetrische Aufnahmen auf der Station geschehen.

Generell nachteilig bei Stationskalibrierungen wirkt sich aus, dass sich sowohl die Umgebungsbedingungen als auch die Geometrie der Satellitenbahnen ändern können. Die GPS-Satellitenbahnen variieren in einem Bereich von etwa $\pm 3^\circ$ quer zu ihren Bahnen innerhalb einiger Monate und Jahre, daher bietet sich eine Wiederholung der Kalibrierung nach etwa einem Jahr zu anderen Jahreszeiten an. Die Modelle müssen hinsichtlich einer adaptiven Filterung des Multipath erweitert werden, die die Variationen durch Wettereinflüsse und Geometrieänderungen berücksichtigen. Die Nutzung der Daten aus einem genügend überbestimmten Referenzstationsnetz oder weiterer Monitorstationen, zusammen mit der Einbeziehung des Signal/Rausch-Verhältnisses und dessen Änderung können für die Weiterentwicklung des Verfahrens wichtige Erkenntnisse liefern.

Eine weitergehende Anwendung der Dekorrelation des Multipath durch quasi zufällige Bewegungen ist bei fester Installation des Roboters oder einer ähnlichen Montierung direkt auf der Referenzstation im Echtzeitbetrieb denkbar. Diese kann die Modellierung des Multipath in einem Referenzstationsnetz unterstützen.

6.3.6 Fazit

Zur Modellierung des Multipath auf Referenzstationen ist ein neuartiges Verfahren entwickelt worden, das es erlaubt, absolute Korrekturen in Abhängigkeit von Azimut und Elevation zu bestimmen. Voraussetzung für eine vollständige Trennung der stationsabhängigen Fehleranteile ist die absolute Kalibrierung der beteiligten GPS Antennen.

Es wurde gezeigt, dass systematische Effekte des Multipath durch Roboterbewegungen dekorreliert werden. Sowohl die Analyse der Doppeldifferenzen als auch der Positionsgenauigkeiten zeigen deutliche Verbesserungen bei einem kalibrierten, statischen Empfänger bis in den Millimeterbereich.

Das Verfahren befindet sich noch in einem frühen Stadium, kann aber bereits operationell angewandt werden. Zukünftige Weiterentwicklungen können die Operationalität und die Genauigkeit des Verfahrens erhöhen. Eine adaptive Filterung des Multipath kann hier bedeutende Fortschritte schaffen. Besonders in dem kommenden Zeitraum mit geringen entfernungsabhängigen Fehleranteilen durch Abnahme der ionosphärischen Aktivitäten können Analysen in einem gut ausgebauten, zumindest teilweise stationskalibrierten Referenzstationsnetz zur besseren Modellierung der Multipathvariationen beitragen.

Die Berücksichtigung von Stationskalibrierungen erschließt dem Nutzer eine Genauigkeit im Millimeterbereich für die Positionsbestimmung statischer Punkte. Dies gilt auch für die Höhenkomponente. Die Stationskalibrierung wird sowohl die Performance eines Referenzstationsnetzes als auch die Genauigkeit eines Punktnetzes für geodynamische Analysen verbessern.

6.4 Echtzeiterfordernisse bei Absoluter Antennen- und Stationskalibrierung

Für Echtzeitanwendungen ergibt sich durch die zusätzliche Korrektur eine weitere Problematik bezüglich der Datenübertragung. Um die Korrekturen auf die Daten der Referenzstation anbringen zu können, müssen sie dem Nutzer übermittelt werden. Hierbei sind verschiedene Konzepte denkbar:

- Die stationsabhängigen Korrekturen werden dem Nutzer per Funk übermittelt. Der Nutzer hat die Möglichkeit, diese Korrekturen nach seinem Belieben zu nutzen. Die Vorgehensweise hätte zur Folge, dass die Korrekturen die Datenübermittlung zusätzlich belasten. Der Nutzer benötigt die Daten der Stationskalibrierung nur einmal zu Beginn der Messung. Folglich ist es nicht notwendig, die Korrekturen zu jeder Messepoche zu senden. Jedoch muss gewährleistet sein, dass dem Nutzer die Stationskalibrierung bei der Initialisierung seiner Messung zur Verfügung steht. Bei Wechsel der Referenzstation durch den Übergang in einen anderen Einzugsbereich müssen die Korrekturen ebenfalls lückenlos verfügbar sein und korrekt vom Nutzer angebracht werden.
- Die stationsabhängigen Korrekturen der Referenzstation werden dem Nutzer vor der Messung bekannt gegeben. Dies könnte zum Beispiel über Internet geschehen. In einem Referenzstationsnetz, in dem ein Nutzer mehrere Stationen nutzen möchte, könnten die stationsabhängigen Korrekturen aller Stationen an den Nutzer mit einer Kennung übermittelt werden. Die Kennung wird dann in den RTCM-Daten zum Beispiel mit dem Typ 3 übermittelt, so dass eine Zuordnung zu den abgespeicherten Stationskalibrierungen möglich ist.
- Die Stationskalibrierungen werden direkt auf der Referenzstation an die Messungen angebracht und um diese Effekte bereinigt. Zusätzliche Daten zur Übertragung fallen nicht an ("Nullantenne").

Bei der "Nullantenne" kann vorausgesetzt werden, dass die Beobachtungsdaten im Rahmen der Messgenauigkeit der Kalibrierungsparameter um die systematische Effekte der stationsabhängigen Fehleranteile bereinigt sind. Der Nutzer des Referenzstationsdienstes kann somit über ein Maximum an Genauigkeit verfügen, sofern seine eingesetzten Antennen ebenfalls kalibriert sind. Hinsichtlich einer reduzierten Datenübertragung und -verarbeitung in einem Referenzstationsnetz weist die "Nullantenne" deutliche Vorteile auf.

Kapitel 7

Nutzung von GPS und INS in einem hydrographischen Messsystem

Aus GPS-Messungen können unter anderem die folgenden Informationen abgeleitet werden:

- Position der GPS-Antenne,
- Zeitpunkt der GPS-Messungen, Realisierung des GPS-Zeitrahmens,
- Geschwindigkeit der GPS-Antenne,
- Orientierungswinkel aus GPS-Mehrantennensystem.

Untersuchungen zur Genauigkeit der GPS-Positionsbestimmung sind in den Kapiteln 4 und 6 dargestellt. Der GPS-Zeitrahmen ergibt sich zusammen mit der GPS-Positionsbestimmung. Einige geodätische Empfänger haben eine analoge PPS-Puls-Ausgabe (*pulse-per-second*) realisiert, mit denen die Zeitbasen verschiedener Systeme synchronisiert werden können. Die Genauigkeit dieses Zeitpulses wird in handelsüblichen geodätischen Empfängern mit bestenfalls 25 ns (ohne SA) angegeben. Grundlagen und Untersuchungen zur Bestimmung von Geschwindigkeiten und Orientierungswinkel mit GPS sind in den folgenden Abschnitten 7.1 und 7.2 beschrieben.

In einem Großteil der hydrographischen Anwendungen ist eine Integration zusätzlicher Sensoren sinnvoll einsetzbar, vor allem für die

- Transformation der GPS-Positionen auf einen anderen Punkt der Plattform,
- Stützung der GPS-Position,
- Überbrückung von GPS-Datenlücken,
- Verringerung des Datenalters für eine präzise GPS-Position und
- Erhöhung der Datenrate einer präzisen GPS-Position.

Für Anwendungen niedriger Genauigkeit stehen eine Vielzahl weiterer Sensoren wie Magnetkompass und Schiffslog zur Verfügung. Für die präzisen Anwendungen kommen vornehmlich inertielle Messsysteme (IMS, engl.: *inertial measurement units* IMU) zum Einsatz. Das Grundprinzip der inertialen Messtechnik wird kurz anhand von Feder- und Pendel-Beschleunigungsmessern beziehungsweise mechanischen Kreiseln im Kapitel 7.3.1 erläutert. Untersuchungen zur Positions- und Lagebestimmung mit inertialen Messsystemen schließen sich an.

7.1 GPS-Geschwindigkeiten

Es lassen sich zwei Arten von Geschwindigkeiten aus den GPS-Beobachtungen ableiten. Zum einen können Geschwindigkeiten aus den Dopplermessungen der Phasensignale, zum anderen aus den Positionsdifferenzen gegenüber der Zeit berechnet werden.

Der Dopplereffekt bewirkt eine Verschiebung einer ausgesendeten Frequenz bei relativer Bewegung des Senders gegenüber dem Empfänger (longitudinaler Dopplereffekt). In der Satellitengeodäsie werden integrierte Dopplermessungen als Beobachtungen zur Bestimmung von Positionen und deren Differenzen verwendet. Zur Messung der momentanen Geschwindigkeit eines Fahrzeugs werden im Gegensatz dazu die instantanen oder Roh-Dopplermessungen verwendet.

Die von den Satelliten ausgesendete Frequenz f_s (Code- oder Trägerphase) wird abhängig von der relativen Bewegung mit der Frequenz f_r im Empfänger gemessen. Die Geschwindigkeit ds/dt kann nach [Seeber 1993] über die Lichtgeschwindigkeit c abgeleitet werden aus:

$$f_r(t) = f_s \cdot \left(1 - \frac{1}{c} \cdot \frac{ds}{dt}\right) \iff \frac{ds}{dt} = c \cdot \left(1 + \frac{f_r(t)}{f_s}\right). \quad (7.1)$$

Die Dopplerwerte werden aus der Messung der Anzahl der Trägerphasenzyklen in einem kurzen Zeitraum dividiert durch die Zeitdifferenz gewonnen. Die Roh-Dopplermessungen werden je nach Empfängertyp unterschiedlich abgeleitet. So beschreiben [Cannon et al. 1997], dass der Dopplerwert für die *NovAtel MiLLenium GPSCard* mit 100 Hz aufdatiert, jedoch über 50 ms bis 100 ms gemittelt wird. Der in den Untersuchungen am IfE zumeist eingesetzte *Ashtech Z-12* leitet den Dopplerwert aus einer 3-Punktinterpolation der letzten drei 0.5 s-Phasenmessungen ab.

Von den GPS-Empfängerherstellern werden Genauigkeiten im Bereich von 0.01 cm/s genannt. [Cannon et al. 1997] weisen in Simulationen jedoch Abhängigkeiten von Beschleunigungen und Stößen nach, die Abweichungen von einigen Dezimetern pro Sekunde auch für hochpräzise Anwendungen bewirken können. Verbesserungen ergeben sich durch eine aus der Trägerphasenmessung nachträglich abgeleiteten Dopplermessung (engl.: *carrier-phase-derived-doppler*). Bei Anwendungen mit geringen Dynamiken werden Genauigkeiten von wenigen cm/s mit den Roh-Doppler und wenigen mm/s mit den abgeleiteten Dopplerwerten erreicht. Bei hoher Dynamik (Beschleunigungen von bis zu 5 g) in einer Fluganwendung kann es zu Standardabweichungen von mehreren dm/s bis hin zu wenigen m/s kommen, wobei im Gegensatz zu den geringen Dynamiken die Roh-Dopplermessungen der genannten Empfänger bessere Ergebnisse liefern (*Ashtech Z-12 (bis 3g): 0.35-1.6 m/s; NovAtel MiLLenium GPSCard (bis 5g): 0.2-0.6 m/s*).

7.2 Lagebestimmung mit einem GPS-Mehrantennensystem

Bereits aus den Geschwindigkeiten in Nord- (v_N) und in Ost-Richtung (v_E) einer einzelnen GPS-Antenne lässt sich einfach ein Kurs über Grund (Trackwinkel) im geographischen System ableiten. Dieser Kurswinkel ergibt sich zu:

$$\tan\phi = \frac{V_N}{V_E}. \quad (7.2)$$

Der Trackwinkel beschreibt jedoch nicht die Ausrichtung der Plattform, sondern das Bewegungsverhalten der Antenne. Die Nord-Orientierung der Plattform ist bei nicht landgebundenen Fahrzeugen durch äußere Einflüsse wie Wind und Strömungen vom Trackwinkel um den Gierwinkel verschieden.

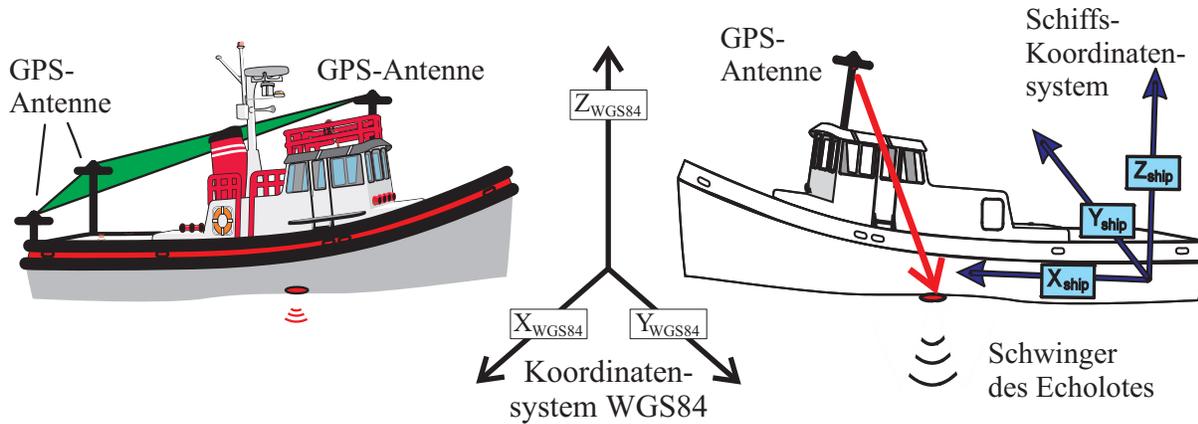


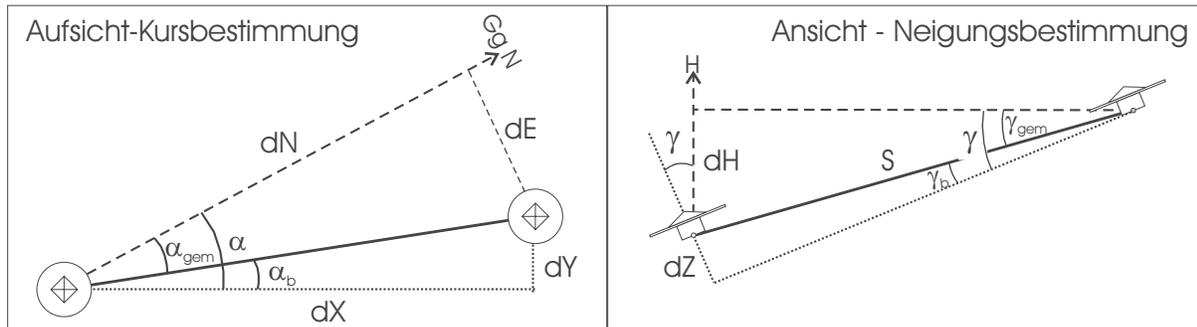
Abbildung 7.1: Schiffs-Lagebestimmung mit einem GPS-Mehrantennensystem. Reduzierung einer GPS-Position auf einen Schwinger (engl.: *echo sounder*).

Ein Mehrantennensystem an Bord eines Schiffes wird üblicherweise aus zwei bis vier GPS-Antennen gebildet, deren Koordinaten im Schiffskoordinatensystem mit hoher Genauigkeit bekannt sind. Vernachlässigt man auftretende Verformungen des Schiffes und dessen Aufbauten, so bilden die Antennen ein festes Gebilde, das sich im Raum bewegt. In diesem Array können zu jeder Messepoche die Mehrdeutigkeiten der Phasenmessungen und dadurch die Koordinatenunterschiede zwischen den Antennen im erdfesten System WGS84 bestimmt werden. Gleichzeitig wird aus den GPS-Messungen die Absolutposition mindestens einer GPS-Antenne bestimmt. Aus diesen Beobachtungen können die Lagewinkel des Antennenarray beziehungsweise des Schiffes gegenüber dem lokal geodätischem System gebildet werden. Die Abbildung 7.1 zeigt vereinfacht die Zusammenhänge. Die Werte sind nicht an das Schwerfeld der Erde gebunden. Übliche Anforderungen an die Genauigkeit der Schiffs-lagebestimmung sind etwa 0.1° (siehe Kapitel 2.4). Lotabweichungen erreichen laut [Torge 2001] $10''$ im Flachland und $1'$ im Hochgebirge, so dass sie im Folgenden hinsichtlich der Bestimmung der Schiffsorientierung mit GPS vernachlässigt werden.

Durch die Ausrichtung der GPS-Basislinie bestehend aus zwei Antennen entlang der Schiffs-längsachse X können die Lagewinkel Kurs und Stampfen (Kap. 2.4) direkt abgeleitet werden. Eine Ausrichtung senkrecht hierzu dient der Bestimmung des Kurses und des Rollens. Da generell Rollen und Stampfen in den Fehlerbetrachtungen ähnlich betrachtet werden können, wird im Folgenden zumeist von Neigungen gesprochen. Das Rollen wird im Allgemeinen aufgrund seiner Auswirkungen auf hydrographische Messungen als die wichtigere Größe betrachtet. Die Berechnung der Lagewinkel (Kurs α und Neigung γ) aus den Differenzen der Antennenkoordinaten in dem lokal ellipsoidischen System in Nord- (dN), Ost- (dE) und Höhenkomponente (dH) unter Berücksichtigung der Antenneneinmessungen im Schiffskoordinatensystem XYZ und den Antennenstrecken S ergibt sich wie in Abbildung 7.2 ersichtlich zu:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{dN}{dE}\right) + \arctan\left(\frac{dY}{dX}\right) \quad (7.3)$$

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{dH}{S}\right) + \arcsin\left(\frac{dZ}{S}\right). \quad (7.4)$$

Abbildung 7.2: Schiffs-Lagebestimmung mit einem Zwei-Antennensystem. α : Kurs, γ : Neigung.

Die Genauigkeit der Lagewinkelbestimmung mit GPS hängt zum einen von der Qualität der Satellitenmessungen und zum anderen wesentlich von der Länge der Zwischenantennenstrecken ab. Entfernungsabhängige Einflüsse können auf dem Schiff vernachlässigt werden. Variationen der Antennenphasenzentren können durch Anbringen von PCV-Korrekturen (siehe auch Abschnitt 6.1.3) eliminiert oder aber durch einheitliche Ausrichtung baugleicher GPS-Antennen im Koordinatensystem des Schiffes reduziert werden. Durch den Einsatz von Einfrequenz-Empfängern zur Lagewinkel-Bestimmung ist kein messbarer Genauigkeitsverlust anzunehmen, da ionosphärische Einflüsse auf derart kurzen Entfernungen kaum eine Rolle spielen, sofern sie nicht durch Szintillationen zum Signalabbruch führen.

Zur Abschätzung der Genauigkeit der Winkelbestimmung wird vereinfacht das Fehlerfortpflanzungsgesetz [Pelzer 1985] ohne Berücksichtigung vorhandener Korrelationen angewendet. Aus den Formeln 7.3 und 7.4 abgeleitet ergibt sich im Bogenmaß:

$$\delta^2 \alpha = \left(\frac{\delta dN}{dE + \frac{dN^2}{dE}} \right)^2 + \left(\frac{dN \cdot \delta dE}{dE^2 + dN^2} \right)^2 + \left(\frac{\delta dY}{dX + \frac{dY^2}{dX}} \right)^2 + \left(\frac{dY \cdot \delta dX}{dX^2 + dY^2} \right)^2 \quad (7.5)$$

$$\delta^2 \gamma = \left(\frac{\delta dH}{S \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{dH}{S}\right)^2}} \right)^2 + \left(\frac{dH \cdot \delta S}{S^2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{dH}{S}\right)^2}} \right)^2 + \left(\frac{\delta dZ}{S \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{dZ}{S}\right)^2}} \right)^2 + \left(\frac{dZ \cdot \delta S}{S^2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{dZ}{S}\right)^2}} \right)^2 \quad (7.6)$$

Die Genauigkeit der GPS-Messungen hängt im Wesentlichen vom PDOP bzw. vom HDOP und der Phasenmessgenauigkeit ab. Die Einmessung der Antennen kann über Tachymetrie oder über ein geeignetes GPS-Verfahren erfolgen. Realistische Abschätzungen für erreichbare Genauigkeiten sind:

- $\delta dN = \delta dE = 5$ mm für die horizontalen Komponenten aus GPS
- $\delta dH = 7$ mm für die vertikale Komponente aus GPS
- $\delta dX = \delta dY = \delta dZ = \delta S = 10$ mm für die Einmessungen der Antennen auf dem Schiff.

Formel 7.7 beschreibt vereinfacht die Winkelaufösung $d\gamma$ in Abhängigkeit von der Basislänge s und vom Messfehler dq quer zur Basis in der Winkalebene [Heimberg 1994].

$$d\gamma = \frac{dq \cdot \rho}{s} \quad (7.7)$$

s	0.5 m	1 m	2 m	5 m	10 m	20 m	30 m
$d\alpha$	0.802°	0.401°	0.200°	0.081°	0.040°	0.020°	0.013°
$d\gamma$	1.146°	0.573°	0.286°	0.115°	0.057°	0.029°	0.019°

Tabelle 7.1: Abschätzung der erreichbaren Winkelauflösung $d\gamma$ aus der Basislänge s zwischen zwei GPS-Antennen aus Formel 7.7 mit der Querabweichung $dq = 0.007$ m für die Bestimmung eines Kurswinkels α und $dq = 0.01$ m für die Bestimmung eines Neigungswinkels γ .

Da die Höhenkomponente bei der Bestimmung über GPS etwa um den Faktor $\sqrt{2}$ schlechter bestimmt wird als die horizontalen Komponenten, ist auch die Kursbestimmung im GPS-Antennenarray genauer als die Neigungswinkelbestimmung. In Tabelle 7.2 sind Abschätzungen mit $dq = 0.010$ m für die Bestimmung eines Neigungswinkels γ und mit $dq = 0.007$ m für die Bestimmung eines Kurswinkels α über verschiedene wirksame Basislängen s gegeben. Demnach sind Genauigkeiten von 0.1° mit Basislängen von etwa 5 m erreichbar.

Auf großen Messschiffen ist in der Praxis die Festlegung der Schiffsachsen, zu denen die Antenneneinmessungen erfolgen sollen, nur schwer zu realisieren. Es hat sich aber als praktikabel und hinreichend genau erwiesen, die innere Geometrie des Antennenarray aus mehrstündigen GPS-Messungen abzuleiten. Der Bezug zum Schiffskoordinatensystem wird über Konstruktionszeichnungen und unterstützend durch terrestrische Verfahren (Distanzmesser, Tachymeter, Nivellier) hergestellt, sofern es die Dynamik des Schiffes zulässt. Dabei werden die Antennen über eingemessene Punkte, deren Koordinaten mit Dezimeter-Genauigkeit aus den Konstruktionszeichnungen abgeleitet werden können, in das Schiffssystem eingepasst. Die innere Geometrie des Array bleibt dabei unverändert. Liegt das Schiff nicht statisch im Trockendock, können nur rotationsinvariante Zwischenantennenstrecken zur Transformation herangezogen werden. Zusätzlich müssen auch die zu beschickenden Zielsensoren (z.B. Schwinger des Echolotes) präzise in Bezug zu dem Array eingemessen werden.

Die Auswirkungen der Schiffsverformungen auf die Genauigkeit lassen sich durch eine geeignete Auswahl der Standpunkte reduzieren. Aus der Analyse der Zwischenantennenstrecken lassen sich generell Verformungen aus den Beobachtungen ableiten, die gegebenenfalls berücksichtigt werden können. Die Auswahl der Antennenstandorte richtet sich nach:

- den vorhandenen Sichthindernissen,
- der Stabilität des Aufbaus (feste Verbindung zum Schiff),
- der Stabilität der Zwischenantennenstrecken und
- der notwendigen Länge der Basislinien

an Bord des Schiffes.

Die Einbindung von mehr als zwei Antennen zur Lagebestimmung wird in dem Echtzeitprogrammssystem COMPASS der Firma Geo++[®] vorgenommen. Zum Einlesen der Empfängerdaten, zur Vorverarbeitung und zur Visualisierung werden *GNRT*-Module (siehe Kapitel 3.4.2) verwendet.

7.3 Positions- und Lagebestimmung mit inertialen Messsystemen

Im Folgenden werden die Grundlagen der Positions- und Lagebestimmung mit inertialen Messsystemen und die Integration mit GPS-Informationen beschrieben.

7.3.1 Grundlagen inertialer Messsysteme

Grundlage der folgenden Darstellung des inertialen Messprinzips bilden [Farkas-Jandl 1986] und [Bäumker 1995]. Bezugssysteme werden als Inertialsysteme (*inertia*, lat.: Trägheit) bezeichnet, wenn Massen, auf die keine Kräfte wirken, gegenüber dem Bezugssystem keine Beschleunigungen aufweisen. Erfährt das Inertialsystem eine Beschleunigung \vec{r} , so bewirkt dies eine Kraft \vec{F} auf eine Prüfmasse m im System, die gemessen werden kann. Äquivalent zum Kraftgesetz ergibt sich das Messprinzip der Inertialvermessung mit

$$\vec{F} = m \cdot \vec{r} \quad \Longleftrightarrow \quad \vec{r} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (7.8)$$

Zusätzlich wirkt die Schwerebeschleunigung \vec{g} im Schwerfeld der Erde auf die Kraftmessungen \vec{F} ein.

$$\vec{F} = \vec{r} - \vec{g} \quad \Longleftrightarrow \quad \vec{r} = \vec{F} + \vec{g} \quad (7.9)$$

Nach der ersten Integration über die Zeit mit der Anfangsgeschwindigkeit \vec{r}_0 ergibt sich die Geschwindigkeit \vec{r} . Die Positionsänderung $\vec{r}_i - \vec{r}_0$ wird dann aus der zweiten Integration über die Zeit mit einer Startposition \vec{r}_0 berechnet.

$$\vec{r}_i - \vec{r}_0 = \int_{t_0}^{t_1} \int_{s_0}^{s_1} \vec{r} ds dt \quad (7.10)$$

Das Formelwerk hat zunächst nur in inertialen Systemen Gültigkeit. Abbildung 7.3 zeigt die für die Inertialnavigation maßgeblichen Koordinatensysteme, die im Folgenden beschrieben werden. Als quasi inertiales Koordinatensystem kann das *Conventional Inertial System* (CIS) bezeichnet werden. Es ist durch den Massenmittelpunkt der Erde, den Frühlingspunkt und den Nordpol festgelegt und in Katalogen von Sternen und Radioquellen mit einer Genauigkeit von besser als $0.1''$ realisiert. Bezogen auf dieses Koordinatensystem scheinen alle besagten Sterne und Radioquellen von der Erde betrachtet mit den zur Verfügung stehenden astronomischen Beobachtungsverfahren nahezu unbeschleunigt. Für Trägheitsnavigationssysteme höchster Genauigkeit sind geringere Ansprüche an ein inertiales Koordinatensystem ausreichend, da diese eine Drift von etwa $1.8''/h$ aufweisen, entsprechend $5 \cdot (10^{-4})^\circ/h$. Daher kann für diese Anwendung ein kartesisches, raumfestes System (i) als quasi inertial betrachtet werden, dessen

- Ursprung ebenfalls im Massenmittelpunkt der Erde liegt,
- Z-Achse zum Nordpol in Richtung der mittleren Erdrotationsachse,
- X-Achse senkrecht auf Z in der mittleren Meridianebene von Greenwich zur Sternzeit $t = 0h$ und
- Y-Achse senkrecht zu X und Z in der Äquatorebene (z.B. rechtshändig im CIS)

ausgerichtet ist.

Die Abweichungen zum zuvor genannten System sind mit

- Eigenbewegung ($1''/a \Rightarrow 3 \cdot (10^{-8})^\circ/h$),
- Präzession ($50''/a \Rightarrow 1.5 \cdot (10^{-6})^\circ/h$),
- Nutation ($3''/a \Rightarrow 1 \cdot (10^{-7})^\circ/h$) und
- Polbewegung (abgeschätzt mit maximal $5 \cdot (10^{-5})^\circ/h$)

der Erde mit ausreichender Näherungsgenauigkeit als vernachlässigbar zu betrachten. Für höchste Genauigkeiten muss zusätzlich die Polbewegung angebracht werden. In einem erdfesten System (e) ist die Drehung der Erde als wirksame Kraft vorhanden.

Die Messdaten werden in einem körperfesten System (b), dem Fahrzeug-Navigationssystem, generiert, dessen Ursprung durch den Schnittpunkt der Koordinatenachsen des inertialen Messsystems gegeben ist. Üblicherweise wird die

- Z-Achse in Richtung der Lotrechten,
- X-Achse senkrecht zu Z in Fahrtrichtung und die
- Y-Achse senkrecht zu X und Z in einem rechtshändigen System

gewählt. Die Drehungen um die Z-Achse entsprechen in der Navigation zur See den Winkeln Kurs bzw. Gieren, um die X-Achse dem Rollen und um die Y-Achse dem Stampfen. Als Zielsystem der navigatorischen Positionsbestimmungen gilt jedoch das lokal geodätische System (l), das Navigationssystem. Der Einfachheit halber wird hier der Ursprung ebenfalls im Beschleunigungsmesser-Dreibein, somit ohne Exzentrizität zum (b)-System, angegeben. Es ist die

- Z-Achse senkrecht auf der Ellipsoidnormalen nach unten,
- X-Achse senkrecht dazu in Richtung des Ortsmeridian nach Norden und
- Y-Achse senkrecht zu X und Z im rechtshändigen System nach Osten

ausgerichtet.

Transformationen zwischen den Systemen erfolgen über die Berechnung der Einflüsse der

- Schwerebeschleunigung,
- Coriolisbeschleunigung,
- Erddrehrate und der
- Transportrate.

Weiterhin werden die Orientierungswinkel des Fahrzeugs hierfür benötigt.

Als Beschleunigungsmesser kommen in geodätischen Anwendungen (z.B. Schweremessungen) im Allgemeinen Instrumente zum Einsatz, bei denen die wirksame Beschleunigung aus der Längenänderung einer Feder mit der Länge l und der Federkonstante c abgeleitet wird (Federbeschleunigungsmesser). In der Navigation werden zumeist Pendel-Beschleunigungsmesser eingesetzt. Die

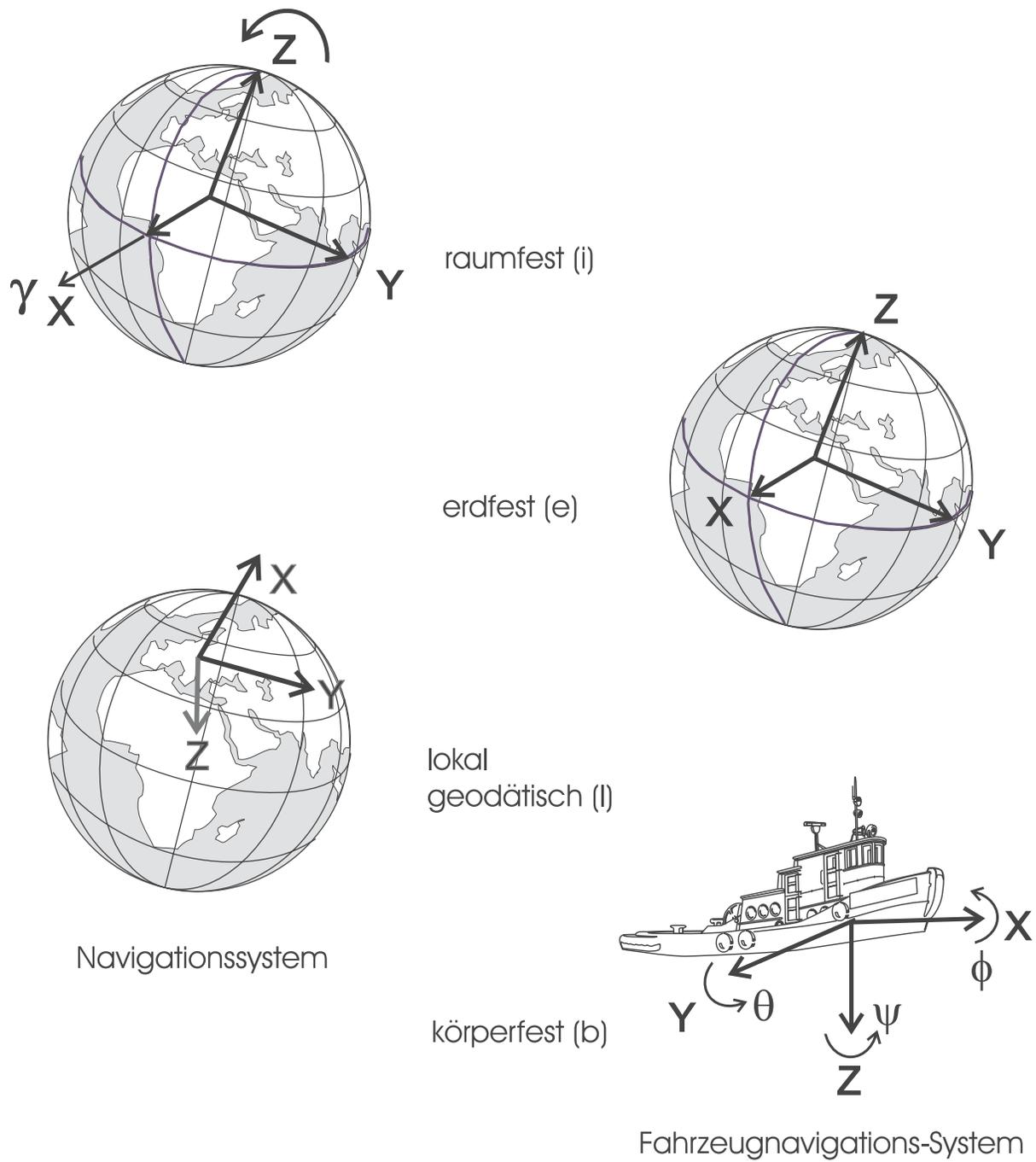


Abbildung 7.3: Koordinatensysteme der Inertialmessung.

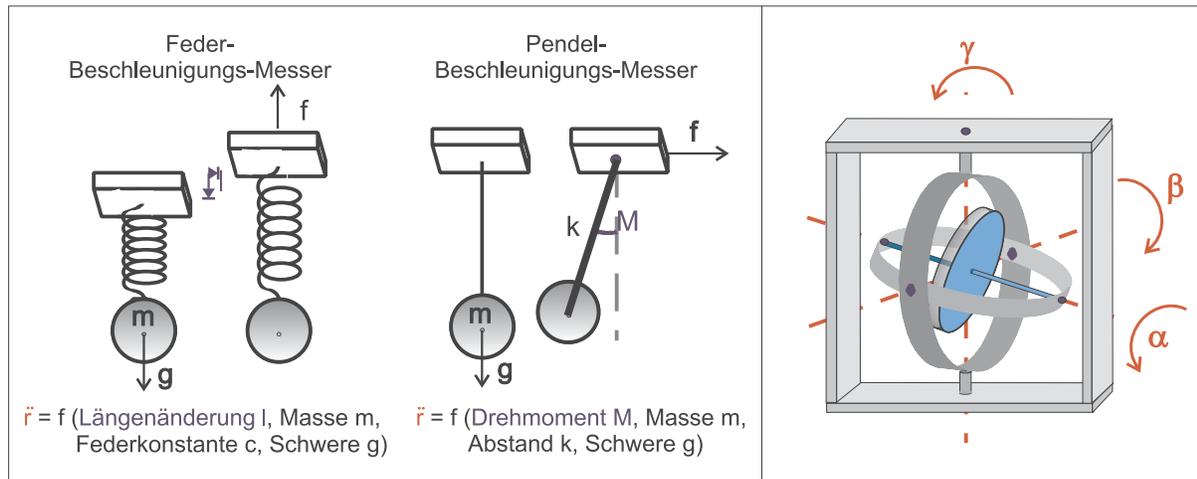


Abbildung 7.4: Prinzipsskizzen zur Funktion inertialer Messkomponenten.

Linke Skizze: Feder- und Pendel-Beschleunigungsmesser. Rechte Skizze: Kardanische Lagerung eines technischen Kreisels.

Beschleunigung wird aus dem Drehmoment M abgeleitet, das auf das Pendellager wirkt, in dem ein Pendel der Masse m mit der Länge k angebracht ist. Die Abbildung 7.4 zeigt in der linken Hälfte skizzenhaft die beiden Messprinzipien.

Die wichtigsten Fehlerarten, die die Qualität eines Beschleunigungsmessers beschreiben, sind durch den Bias/Zero-Offset und den Skalenfaktorfehler gegeben. Der Bias entsteht durch Einflüsse wie zum Beispiel Fertigungsfehler, Temperatureinwirkungen, Alterserscheinungen und Vibrationen und bewirkt unter anderem, dass bei ruhendem Instrument neben der Erddrehrate und der Schwerebeschleunigung Störschleunigungen gemessen werden. Die Beschleunigungen werden üblicherweise durch Rückstellspannungen ermittelt. Die Umrechnung erfolgt über Proportionalitätskonstanten, die Unsicherheiten aufweisen können (Skalenfaktorfehler).

Für die Transformation der gemessenen Beschleunigungen vom (b)-System in das lokal geodätische (l)-System wird die Orientierung des Beschleunigungsmesser-Dreibehns im Raum benötigt. Desweiteren werden die Daten um den Einfluss der Schwere- und der Coriolisbeschleunigung korrigiert. Die Schwerebeschleunigung wird genügend genau mit der Normalschwereformel über die geographische Breite φ und die Höhe h modelliert. Die Coriolisbeschleunigung entsteht abhängig von der geographischen Breite als scheinbare Beschleunigung durch Veränderung des Erddrehratenvektors. Zur Berechnung wird neben der geographischen Breite und der Erddrehrate der Geschwindigkeitsvektor des Fahrzeugs genutzt.

Zur Bestimmung der Orientierung des Beschleunigungsmesser-Dreibehns im (l)-System werden insbesondere die Messungen von technischen Kreiseln verwendet. Technische Kreisel mit üblicherweise 10.000 bis 40.000 Umdrehungen pro Minute behalten die Ausrichtung ihrer Laufachse bei, sofern kein Drehmoment auf den Kreisel einwirkt und weichen rechtwinklig zu einem wirkenden Drehmoment aus. Über die Messung des Drehimpulses kann ein Winkelgeschwindigkeitsvektor abgeleitet werden. Bei kardanischer Lagerung des Kreisels behält die Laufachse die Richtung auch bei Wirkung von Drehmomenten bei (siehe Abb. 7.4 rechts). Das Drehmoment wirkt sich in Form von Drehungen der den Läufer tragenden Rahmen gegeneinander und gegenüber dem Gestell aus, die gemessen werden. Anhand der Betrachtung der auftretenden Drehungen können einfach die Freiheitsgrade eines Kreisels bestimmt werden.

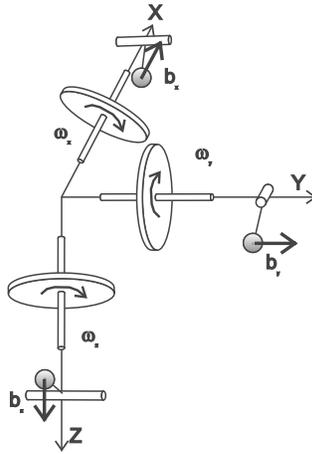


Abbildung 7.5: Mögliche Anordnung der Komponenten in einem INS.

Die Freiheitsgrade werden durch die Drehungen des

- Läufers um seine Laufachse (1. Freiheitsgrad, Winkel α),
- Innenrahmens gegenüber dem Außenrahmen um die Rahmenachse (2. Freiheitsgrad, Winkel β) und
- Außenrahmens gegenüber dem Gestell um die äußere Rahmenachse (3. Freiheitsgrad, Winkel γ)

definiert. Die Drehung des Läufers um seine Laufachse wird im englischen Sprachgebrauch und auch teilweise in der deutschen Literatur nicht als Freiheitsgrad des Kreisels mitgezählt, so dass die rechts in der Abbildung 7.4 dargestellte Konstruktion mit *two degree of freedom* angegeben wird. Im weiteren Verlauf soll diese Art der Zählung übernommen werden, da sie die relevanten Messungen treffender beschreibt.

Das Hauptcharakteristikum für technische Kreisel ist die Kreiseldrift. Fertigungs-Ungenauigkeiten und weitere Störeinflüsse bewirken eine Präzessionsbewegung des Kreisels. Ein weiteres Merkmal neben Bias und Skalenfaktorfehler ist der sogenannte *random walk*, der zwar mit der Wurzel der Zeit zunimmt, in der Praxis aber als Rauschen modelliert werden kann.

Zur Transformation der gemessenen Kreiseldaten vom (b)-System in das (l)-System wird die Erddrehrate als Funktion der Rotationsgeschwindigkeit der Erde und der geographischen Breite und die Transportrate, der Winkelgeschwindigkeitsvektor zwischen (l)- und (e)-System, als Funktion der Geschwindigkeiten im (l)-System und dem Erdradius bestimmt. Weiterhin werden auch hier die Orientierungswinkel benötigt.

In einem inertialen Messsystem werden translatorische und rotatorische Komponenten kombiniert. Als translatorische Komponenten kommen nach [Farkas-Jandl 1986] in konventionellen INS drei einachsige Beschleunigungsmesser mit je einem Freiheitsgrad der Bewegung und als rotatorische Komponenten entweder drei Kreisel mit je einem Freiheitsgrad oder zwei Kreisel mit je zwei Freiheitsgraden in Betracht. Üblicherweise werden die Komponenten wie in Abbildung 7.5 in Richtung des Beschleunigungsmesser-Dreibehns orthogonal angeordnet. Die Beschleunigungen und Drehraten sind über Mechanisierungs-Gleichungen verknüpft. Dabei werden die Orientierungsmessungen der Kreisel zur Transformation der Beschleunigungen, die integrierten Beschleunigungen für die Corioliskorrektur und die Beschleunigungen zur Initialisierung der

	INS	AHRS
Kreiseldrift	$0.001^\circ/h - 0.005^\circ/h$	$0.1^\circ/h - 1^\circ/h$
Beschleunigungsmesser-Bias	$10\mu g - 30\mu g$	$500\mu g - 1000\mu g$
zusätzliche Sensoren	nein	ja

Tabelle 7.2: Anforderungen an die inertialen Sensoren in Abhängigkeit ihrer Anwendung nach [Bäumker 1995].

Kreismessungen genutzt, so dass die oben genannten Transformationen der Messwerte durchgeführt werden können. Das Formelwerk dafür kann [Bäumker 1995] entnommen werden.

In so genannten Plattformsystemen werden diese Transformationen mechanisch durch Kardanrahmen realisiert. Plattformsysteme sind teuer und sehr komplex und finden deshalb kaum Anwendung in der Navigation, sondern vielmehr in der inertialen Geodäsie. In der Navigation sind Strapdownsysteme üblich, bei denen die Komponenten körperfest mit dem Fahrzeug verbunden sind. Transformationen in das inertielle (i) beziehungsweise lokal geodätische System (l) werden durch Berechnungen auf einem Computer durchgeführt, dementsprechend wird diese Art der Realisierung eines inertialen Messsystems auch analytische Plattform genannt. Vorteilhaft für navigatorische Anwendungen wirkt sich die einfachere und kleinere Bauweise bei günstigerem Preis aus. Üblicherweise sind Plattformsysteme genauer als Strapdownsysteme. Die Genauigkeitsanforderungen der Strapdownsysteme reichen für die Navigationsanwendungen aus.

7.3.2 Genauigkeitsanforderungen an inertielle Messsysteme

Ausgehend von der Genauigkeit der verwendeten Komponenten und damit des gesamten Messsystems unterscheidet man zwischen Kurs-Lage-Referenzsystemen (engl.: *Attitude and Heading Reference System*, AHRS) und autonom ausrichtenden Inertialen Navigationssystemen (INS). In [Bäumker 1995] werden INS und AHRS entsprechend den Genauigkeiten ihrer Komponenten wie in Tabelle 7.2 unterschieden. In der Regel werden auch die weniger genauen AHRS als INS bezeichnet.

Die erreichbaren Genauigkeiten ϵ_Φ für Lagewinkel in der Einheit $[\circ]$ und Geschwindigkeiten ϵ_V in $[m/s]$ ermittelt mit inertialen Messsystemen lassen sich nach [Bäumker 2002] aus der Berechnung der Schuleramplituden für unbeschleunigte Geradeausfahrten aus den unten angegebenen Hauptfehlerquellen mit den Formeln 7.11 bis 7.18 in Abhängigkeit der Zeit t in $[min]$ und $\omega = 2\pi/84$ min abschätzen.

Beschleunigungsmesserbias ∇_B in $[mg]$

$$\epsilon_\Phi \approx 0.057^\circ \cdot (1 - \cos(\omega t)) \cdot \nabla_B \quad (7.11)$$

$$\epsilon_V \approx 8 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot \sin(\omega t) \cdot \nabla_B \quad (7.12)$$

Kreiseldrift ϵ_g in $[\circ/h]$

$$\epsilon_\Phi \approx -0.220^\circ \cdot \sin(\omega t) \cdot \epsilon_g \quad (7.13)$$

$$\epsilon_V \approx -31 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot (1 - \cos(\omega t)) \cdot \epsilon_g \quad (7.14)$$

Anfangslagewinkelfehler ϵ_{Φ_0} in $[\circ]$

$$\epsilon_\Phi = \cos(\omega t) \cdot \epsilon_{\Phi_0} \quad (7.15)$$

$$\epsilon_V \approx -138 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot \sin(\omega t) \cdot \epsilon_{\Phi_0} \quad (7.16)$$

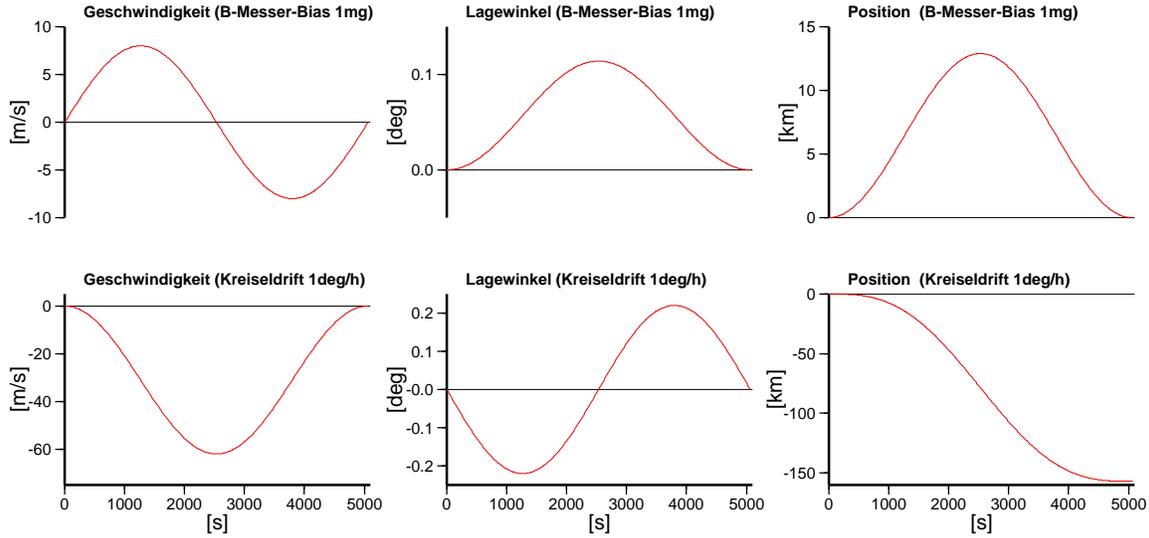


Abbildung 7.6: Schulerschwingungen in Geschwindigkeit, Lagewinkel und Position eines INS berechnet mit einem Beschleunigungsmesser-Bias $\nabla_B = 1 \text{ mg}$ bzw. einer Kreisel drift $\epsilon_g = 1^\circ/\text{h}$.

Anfangsgeschwindigkeitsfehler ϵ_{V_0} in [m/s]

$$\epsilon_\Phi \approx 0.007^\circ \cdot \sin(\omega t) \cdot \epsilon_{V_0} \quad (7.17)$$

$$\epsilon_V = \cos(\omega t) \cdot \epsilon_{V_0} \quad (7.18)$$

Die Schulerschwingung entsteht durch das Wegkippen der analytischen Plattform durch die Kreisel drift und tritt mit einer Wellenlänge von 84 min auf. Schulerschwingungen aufgrund eines Beschleunigungsmesser-Bias $\nabla_B = 1 \text{ mg}$ beziehungsweise einer Kreisel drift $\epsilon_g = 1^\circ/\text{h}$ sind beispielhaft in der Abbildung 7.6 dargestellt. Die Positionsgenauigkeit ϵ_P lässt sich aus der Integration der Geschwindigkeitsfehler ϵ_V über die Zeit ableiten. Die Positionsabweichungen erreichen in diesen Beispielen eines ungestützten AHRS Amplituden bis zu 13 km für $\nabla_B = 1 \text{ mg}$ und 160 km für $\epsilon_g = 1^\circ/\text{h}$.

7.3.3 Integration von GPS und inertialer Messtechnik

Die Integration von GPS und IMS kann nach [Kreye et al. 2001] auf verschiedenen Ebenen stattfinden. In tief gekoppelten Architekturen (*deeply coupled*) werden die IMS Beobachtungen mit den Ausgaben der Regelschleifen des GPS-Empfängers in einem gemeinsamen Kalman-Filter kombiniert. In straff gekoppelten Systemen (*tightly coupled*) werden zum Beispiel IMS-Geschwindigkeiten zur Regelung der Grenzwerte der Regelschleifen des GPS-Empfängers verwendet. Die Bandbreiten der Schleifen werden so auf die Dynamik des Empfängers abgestimmt. Hierfür ist eine spezielle GPS-Ausrüstung erforderlich, die es erlaubt, die Regelschleifen dynamisch anzupassen. In eng gekoppelten Navigationsfilter (*closely coupled*) fließen alle GPS und IMS Beobachtungen ein, ohne dass die Messgrößen direkt beeinflusst werden.

Diese Konzepte setzen die vollständige Kenntnis der Ausgangsdaten des IMS einschließlich der Stochastik voraus. In einem modularen Aufbau, der auf der Kombination handelsüblicher Komponenten basiert, muss davon ausgegangen werden, dass die IMS Beobachtungen nicht vollständig vorhanden sind. Bei der hier vorgestellten schwach gekoppelten GPS/IMS Integration (*loosely*

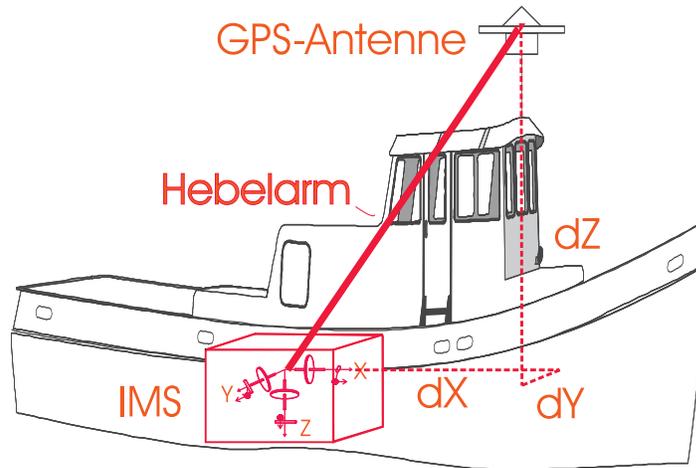


Abbildung 7.7: Hebelarm-Komponenten für die Transformation zwischen GPS und IMS.

coupled) werden die Informationen der GPS-Positions- und Lagebestimmung zur Stützung der von Driften und Nullpunktfehlern beeinflussten Messwerte der inertialen Systeme verwendet. Die GPS-Position im (l)-System kann sowohl in dem Integrationsprozess als auch für die Transformationen vom (b)-System in das (l)-System (z.B. Erddrehrate, Corioliskorrektur) stützend herangezogen werden. Die GPS-Geschwindigkeiten dienen der Bestimmung der Corioliskorrektur. Die Orientierungsbestimmung mit GPS über ein Zwei- oder Drei-Antennen-System dämpft die langperiodischen Anteile der Kreiseldriften und erhöht die Initialisierungsgenauigkeit der Kursbestimmung mit den inertialen Systemen. Die GPS-Informationen liegen meist mit 1 Hz bis 10 Hz und die Inertialdaten mit 50 Hz bis 100 Hz Datenrate vor. Grundlage der Stützung ist eine gemeinsame Zeitbasis.

Die Darstellung der Kombination der GPS- und IMS-Beobachtungen wird am Beispiel der Realisierung des am Institut für Erdmessung verwendeten Systems vorgenommen. Das System wurde mit dem IMS Litef LCR-88 von Prof. Bäumker an der FH Bochum umgesetzt und speziell auf die Anforderungen für die Untersuchungen ausgerichtet (Programm AG_IFE).

Um die GPS und IMS-Beobachtungen zueinander in Beziehung bringen zu können, werden die GPS-Daten in den Ursprung des Beschleunigungsmesser-Dreibehrs transformiert. Dies gelingt über die Orientierungswinkel Kurs, Rollen und Stampfen des Seefahrzeuges und den im IMS-Koordinatensystem vorweg präzise einzumessenden Vektor des Hebelarms. Abbildung 7.7 zeigt die Hebelarmkomponenten. Die Genauigkeit der Bestimmung des Hebelarmes sollte in etwa eine Größenordnung besser als die gewünschte Positionsgenauigkeit sein, um fehlerhafte Einflüsse gering halten zu können. Dies kann unter anderem über Tachymeterverfahren oder geeignete, feste Installationen geschehen, deren Abmessungen als bekannt vorausgesetzt werden können. Weiterhin darf der Hebelarm nicht zu lang sein. Die Genauigkeitsbetrachtungen zur Transformation einer GPS-Position auf einen anderen Sensor in Kapitel 2.4 gelten adäquat zur Hebelarm-Korrektur. Für hochgenaue Anwendungen kommen bestenfalls Hebelarmlängen von etwa 5 m in Betracht, um das Genauigkeitspotential auszunutzen. Dabei sollte der Hebelarm-Vektor in Bezug zum Kurswinkel möglichst invariant sein, da dieser ohne GPS-Stützung am ungenauesten mit dem IMS bestimmt wird. Für die Messungen in dieser Arbeit wurde eine Montierung entwickelt, in der das LCR-88 in eine Führungsschiene eingepasst und die Anbringung der GPS-Antennen an definierten Punkten vorgenommen wird. Der Hebelarm wird somit kurz gehalten und ist mit

hoher Genauigkeit bestimmt. Nachteilig ist, dass das IMS an Deck betrieben werden muss, um möglichst gute Satellitensichtbarkeiten zu erlangen.

Die GPS- und IMS-Beobachtungen können in einem gemeinsamen Kalmanfilter kombiniert werden. Dabei wird laut [Bäumker 1995] der Beobachtungsvektor \vec{y} mit den Differenzen zwischen inertialen und aus den GPS-Beobachtungen abgeleiteten Geschwindigkeiten beziehungsweise Positionen als Elemente aufgestellt.

$$\vec{y} = \begin{bmatrix} (\varphi_{GPS} - \varphi_{INS}) \cdot (R_M + h) \\ (\lambda_{GPS} - \lambda_{INS}) \cdot (R_E + h) * \cos\varphi \\ h_{GPS} - h_{INS} \\ V_{NGPS} - V_{NINS} \\ V_{EGPS} - V_{EINS} \\ V_{DGPS} - V_{DINS} \end{bmatrix}$$

Die Definition der Zustände des Kalmanfilters verlangt eine genaue Kenntnis des Fehlerverhaltens der inertialen Sensoren. Es werden die folgenden 16 Elemente in den Zustandsvektor \vec{x} eingeführt:

1. Nord-Positionsfehler	$\Rightarrow \vec{x} =$	$\delta\varphi$
2. Ost-Positionsfehler		$\delta\lambda$
3. Höhen-Positionsfehler		δh
4. Nord-Geschwindigkeitsfehler		δV_N
5. Ost-Geschwindigkeitsfehler		δV_E
6. vertikaler Geschwindigkeitsfehler		δV_D
7. Verkipfung der analytischen Plattform um Nordachse (Nordtilt)		ϵ_N
8. Verkipfung der analytischen Plattform um Ostachse (Osttilt)		ϵ_E
9. Verdrehung der analytischen Plattform um Vertikalachse		ϵ_D
10. Drift des x-Kreisels		ϵ_{gx}
11. Drift des y-Kreisels		ϵ_{gy}
12. Drift des z-Kreisels		ϵ_{gz}
13. Skalenfaktorfehler des z-Kreisels		ϵ_{skx}
14. Bias des x-Beschleunigungsmessers		ϵ_{bx}
15. Bias des y-Beschleunigungsmessers		ϵ_{by}
16. Bias des z-Beschleunigungsmessers		ϵ_{bz}

In der Varianz-Kovarianzmatrix P_0 werden die a-priori Anfangsfehler beziehungsweise systematischen Fehler modelliert. Die Zeitabhängigkeit der Zustände und der Stochastik werden mit Hilfe der Transitionsmatrix Φ eingeführt. Im *closed-loop*-Kalmanfilter werden die geschätzten Fehler direkt in das System zur Verbesserung der inertialen Parameter zurückgeführt. Im nächsten Rechenzyklus werden die Zustände wieder mit 0 initialisiert.

7.3.4 GPS-gestützte IMS Positions- und Lagebestimmung (Litef LCR-88)

Für Untersuchungen zur Integration von GPS und IMS zur Positions- und Lagebestimmung auf der Basis eines low-cost-Systems wird das AHRS LCR-88 von Litef genutzt. Das System wurde von der FH Bochum zur Verfügung gestellt. Das LCR-88 besteht aus:

- 2 dynamisch trocken gedämpften Kreiseln, jeder mit 2 Freiheitsgraden (Typ K-273),
- 3 Pendel-Beschleunigungsmessern (Typ B-280).

	Kreisel	Beschleunigungsmesser
drift/bias	0.3°/h	500 μg
Skalenfaktor	1000 ppm	1000 ppm
Rauschen	0.05°/ \sqrt{h}	10 μg
Genauigkeit ($2\cdot\sigma$)		
Azimut	0.5° - 2°	
Rollen, Stampfen	0.2° - 1°	
Drehrate	0.1°/s	
Beschleunigung		0.03 g

Tabelle 7.3: Kenndaten des AHRs LCR-88 von Litef [Bäumker 1995].

Die Kenndaten der Hardware-Komponenten des Systems sind in Tabelle 7.3 aufgelistet. Die Genauigkeit für die Initialisierung des Kurswinkels durch Schätzung der Erddrehrate für mittlere geographische Breiten kann mit 2° angenommen werden.

Die Abbildung 7.8 zeigt den Aufbau des GPS-gestützten inertialen Messsystems. Die IMS-Messungen werden durch den PPS-Impuls eines GPS-Empfängers mit der GPS-Zeit synchronisiert (siehe Kapitel 7.3.5). Die Rohdaten werden mit einer Rate von 50 Hz mit einer ARINC-Karte (Datenschnittstelle im Format der *Aeronautical Radio Inc.*) auf einem handelsüblichen, tragbaren PC eingelesen.

Die Winkelinkremente der Kreisel und die Geschwindigkeitsinkremente der Beschleunigungsmesser werden auf dem DOS-Rechner im Programm AG_IFE mit 50 Hz verarbeitet. Als Ergebnisse der Plattform- und Navigationsrechnungen werden Kurs-, Roll- und Nickwinkel, Drehraten, Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Positionen berechnet. Die Stützung des Inertialsystems durch die GPS-Positionen, Geschwindigkeiten und deren Standardabweichungen erfolgt sekundlich in einem Kalmanfilter, sofern gültige Stützinformationen vorliegen. Das Kalmanfilter gibt Kreisel drift, Beschleunigungsmesser bias und Standardabweichungen aus. Weiterhin fließen die Berechnungen in die Plattform- und Navigationsrechnungen ein. Die entsprechenden Algorithmen sind in Kapitel 7.3.3 näher erläutert.

Für die Übergabe der GPS-Stützinformationen an die IMS-verarbeitende Software wurde ein spezielles, dem NMEA-ähnliches Format abgesprochen. Der Datensatz beinhaltet

- Kennung,
- IMS-Zeit in [s],
- Datenalter zum letzten PPS-Puls in [s],
- geographische Breite und Länge in [°] (dezimal),
- ellipsoidische Höhe in [m],
- Standardabweichung in Nord, Ost und Höhe in [m],
- Geschwindigkeit in Nord, Ost und in der Höhe in [m/s],
- Standardabweichung der Geschwindigkeit in Nord, Ost und Höhe in [m/s] und
- Prüfsumme.

Die Ausgabe der Daten erfolgt bei der vorliegenden Version mit einer Datenrate von 1 Hz. Näheres zur zeitlichen Synchronisation wird im folgenden Kapitel erläutert.

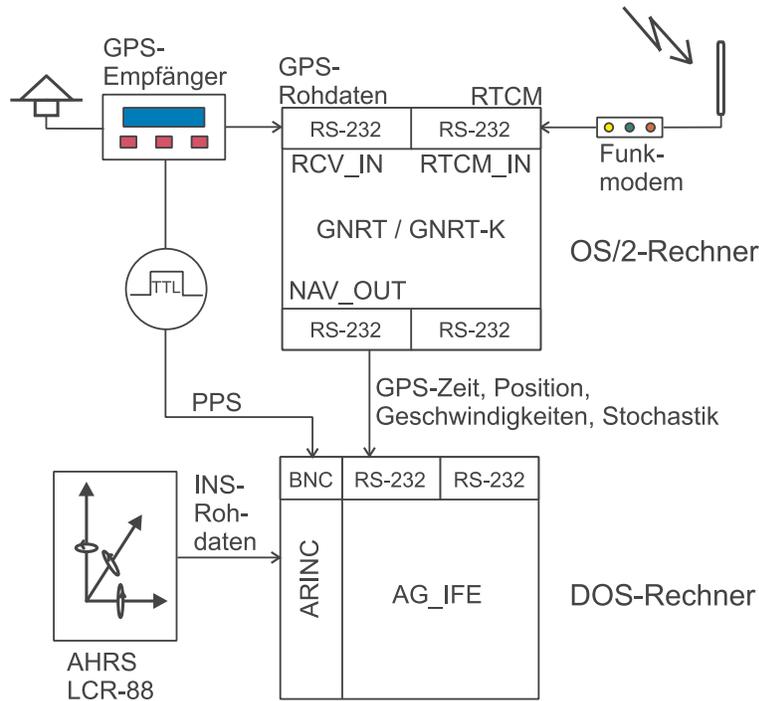


Abbildung 7.8: Stützung des LCR-88 mit einer präzisen DGPS-Lösung in Echtzeit.

7.3.5 Zeitliche Synchronisation der GPS- und INS-Daten

Um eine zeitliche Synchronisation der GPS- und der INS-Informationen zu erhalten, wird oft das PPS-Signal (PPS: *pulse-per-second*) verwendet. Der PPS-Puls wird optional zu jeder vollen GPS-Sekunde mit einer Genauigkeit von besser als $1 \mu\text{s}$ im GPS-Empfänger generiert und auf einen Ausgang als analoges TTL-Signal gelegt. Das analoge Signal wird auf die ARINC-PC-Karte geleitet, die zur Erfassung der Messsignale der inertialen Messeinheit dient. Auf ihr wird das Signal mit einem Zeitstempel einer auf der Karte befindlichen Zeitmess-Einrichtung versehen.

Die GPS-Positionen sind mit präzisen GPS-Zeitinformationen verknüpft. Die Berechnungen werden verzögert zum Zeitpunkt der GPS-Messungen ausgegeben. Das Datenalter kann auf handelsüblichen Rechnern von der GPS-Echtzeit-Software mit einer Genauigkeit von etwa 10 ms bestimmt werden. Die Uhr des Rechners wird mit der GPS-Systemzeit über das Ergebnis der Positions- und Zeitberechnung in Echtzeit und der berechneten Laufzeiten der Informationen in der Hardware synchronisiert. Die Differenz zwischen der Zeitangabe der GPS-Lösung und der synchronisierten Rechnerzeit bei Ausgabe der Information oder auch prädictiert bei Ankunft in dem zu verarbeitenden System ergibt das Datenalter $dT_1(GPS)$, vgl. Abbildung 7.9.

Der Zeitpunkt der Berechnung der INS-Position kann mit der vollen Zeitinformation der PC-Karte (ARINC-Zeit) und der Zeitdifferenz zum letzten PPS-Puls angegeben werden. Eine Möglichkeit, die zeitliche Synchronisation der beiden Zeitskalen, die durch variierende Driften und Offsets differieren, vorzunehmen, ist in Abbildung 7.9 dargestellt. Dem PPS-Puls 1 zu einer zunächst unbekannt vollen GPS-Sekunde wird eine ARINC-Zeit $T_1^P(INS)$ zugeordnet. Diese Information ist sehr genau, jedoch mehrdeutig, da mit dem Puls keine GPS-Zeitinformation geliefert wird. Der Zeitpunkt der Ankunft der dazugehörigen GPS-Position mit der Zeitinformation $T_1(GPS)$ und dem Datenalter $dT_1(GPS)$ erhält ebenfalls einen ARINC-Zeitstempel $T_1^P(INS)$. Durch die Subtraktion von $T_1^P(INS)$ mit $dT_1(GPS)$ errechnet sich die ARINC-Zeit $T_1^S(INS)$

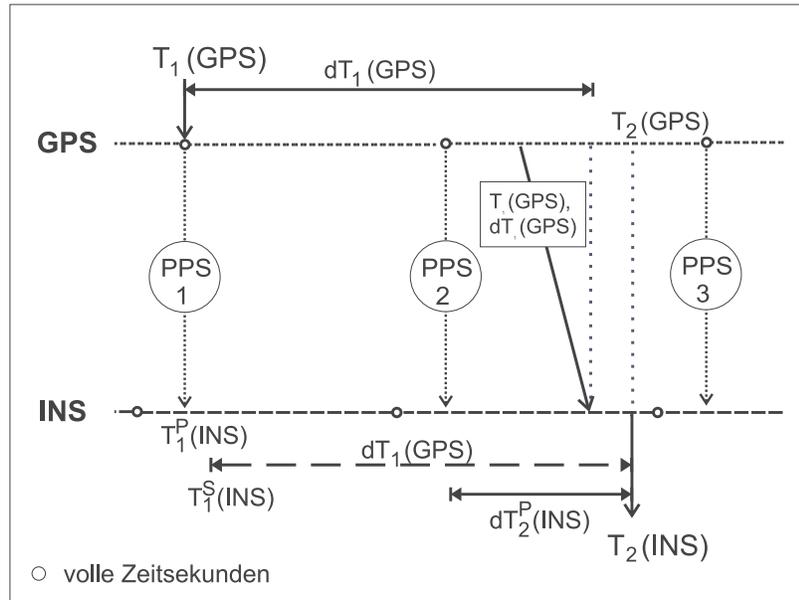


Abbildung 7.9: Synchronisation der GPS- und der inertialen Messungen.

in Abhängigkeit von der Genauigkeit des Datenalters. Die Differenz aus $T_1(GPS)$ und $T_1^S(INS)$ ergibt den genäherten Synchronisationswert der beiden Zeitskalen, der nicht mehr mehrdeutig ist. Diese Mehrdeutigkeit wird abgespalten und mit der Differenz aus $T_1(GPS)$ und $T_1(INS)$ zur präzisen Synchronisation kombiniert.

Die Positionsbestimmung des INS geschieht zur ARINC-Zeit $T_2(INS)$. Die Mehrdeutigkeit der Synchronisationsdifferenz kann aus den eben beschriebenen Betrachtungen als bekannt vorausgesetzt werden. Zugleich wird der Ausgabe zum Zeitpunkt $T_2(INS)$ die Differenzzeit zum letzten PPS-Puls $dT_2^P(INS)$ als Information zugefügt. Die zu $T_2(INS)$ gehörige GPS-Zeit $T_2(GPS)$ kann derart mit nur geringen Abweichungen im Submillisekundenbereich abhängig von der verwendeten Hardware zugeordnet werden.

Die Werte des INS sind mit einem Datenalter von geringer als einer Sekunde gegeben, während die GPS-Positionsbestimmungen mit einem Datenalter von bis zu 3 s und mehr behaftet sind. Die GPS-Echtzeitpositionen sind somit älter als die Echtzeitpositionen des INS. Sollen die Ergebnisse des INS beispielsweise für Navigationsanwendungen schnell ausgegeben werden, dann ergibt sich für das INS die Notwendigkeit, die Messdaten über die letzten Sekunden vorzuhalten. Die Stützung durch das GPS-System erfolgt dann nicht für die aktuellen Daten, sondern extrapolierend über wenige Sekunden für zurückliegende Werte.

Ebenso kann auf eine höhere Genauigkeit der INS-Positionen Wert gelegt und dabei auf eine "jüngere" Position bewusst verzichtet werden. In diesem Falle wird die INS-Position wesentlich verzögert nach Eintreffen der GPS-Position ausgegeben, so dass die GPS-Informationen die INS-Daten optimal interpolierend stützen können. Hier kann es aber zu Schwierigkeiten bei der Messwertausgabe des INS kommen, da das Datenalter der GPS-Positionen abhängig von Datenübertragung und verwendeter Hard- und Software um wenige Sekunden variieren kann.

Im Rahmen der Untersuchungen mit dem Programm AG_IFE wurde auf eine schnelle, kontinuierliche Positionsbestimmung durch das INS Wert gelegt.

7.4 Untersuchungen zur GPS-Lagewinkelbestimmung

Im Folgenden wird beispielhaft ein Vergleich zwischen dem GPS-Mehrantennensystem COM-PASS (siehe Kapitel 7.2) und auf inertialer Technik basierenden Systemen zur Lagewinkelbestimmung durchgeführt. Derartige Vergleiche leiden generell darunter, dass

- die Achsausrichtungen der eingesetzten Systeme unterschiedlich und
- die Drehreihenfolge der Matrizen in der Verarbeitungssoftware der Systeme nicht transparent sind.

Die Problematik der Achsausrichtung bei Nutzung eines GPS-Mehrantennensystems zur Lagebestimmung wird in Kapitel 7.2 angesprochen. Zusätzlich ist die Definition der Schiffsachsen von der Trimmung des Schiffes abhängig, somit gewissermaßen auch zeitabhängig. Es wurde versucht, die mobil eingesetzten Systeme bestmöglich an den Schiffsachsen auszurichten. Abweichungen bei den Achsausrichtungen werden im Folgenden nur als Offset zwischen den Angaben der Systeme betrachtet.

Eine gängige Vorgehensweise ist, die Drehreihenfolge in Abhängigkeit der zu erwartenden Winkel vom kleinsten bis zum größten Wert zu wählen. In marinen Anwendungen wäre dies also die Reihenfolge Stampfen (pitch), Rollen (roll) und der Kurs (heading). Wird stattdessen die Reihenfolge Rollen, Stampfen und Kurs gewählt, so kann dies bei maximalen Auslenkungen von $\pm 10^\circ$ im Rollen oder Stampfen Auswirkungen von bis zu $\pm 1.7^\circ$ im Kurs und $\pm 0.15^\circ$ im Rollen beziehungsweise im Stampfen haben und muss infolgedessen berücksichtigt werden [Bachmann 2001].

Die Drehreihenfolge der Matrizen ist in den eingesetzten Systemen zumeist nicht transparent und kann deshalb nicht berücksichtigt werden. Für das Rollen und das Stampfen sind die Effekte, die durch die Drehreihenfolge entstehen, am geringsten. Von diesen beiden Neigungen ist das Rollen die für hydrographische Anwendungen wichtigere Größe, so dass im Folgenden nur auf das Rollen eingegangen wird.

7.4.1 Vergleich mit inertialen Messeinheiten

Das Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiff (VWFS) *Deneb* ist 52 m lang, 11 m breit, hat einen Tiefgang von 3.45 m und fährt mit einer Geschwindigkeit von maximal 11.6 kt. Für die Messfahrt im August 1997 wurden an Bord des *VWFS Deneb* die folgenden Sensoren zur Bestimmung der Schiffslage installiert:

- Heave-, Roll- und Pitch-Sensor 335B von der Firma TSS (permanent installiert),
- POS/MV 320 von der Firma TSS (nur für Untersuchungen installiert) und
- COMPASS mit drei Ashtech-GPS-Einheiten des Instituts für Erdmessung (nur für Untersuchungen installiert).

Das *Positioning and Orientation System for Marine Vessels* POS/MV 320 der Firma TSS basiert auf einer GPS-unterstützten, inertialen Navigationstechnologie. Das System besteht aus je drei orthogonal angeordneten Kreiseln und Beschleunigungsmesser. Zur GPS-Stützung wird das NovAtel-System 3151R/3051 (Einfrequenz, C/A-Code) mit dem *GPS Azimuth Measurement Subsystem (GAMS)* verwendet. Das GAMS nutzt die Beobachtungen von zwei fest montierten

	GPS-C/A-Code	DGPS-C/A-Code
Horizontale Positions-Fehler	50 m	1 m
Horizontale Geschwindigkeits-Fehler	0.25 m/s	0.1 m/s
Roll- und Pitch-Fehler	0.05°	<0.05°
Kurs-Fehler	0.05°	0.05°
Hub-Fehler	5% des Hubs / 5 cm	5% des Hubs / 5 cm

Tabelle 7.4: Genauigkeiten des TSS POS/MV 320 (laut Systembeschreibung zum POS/MV).

GPS-Antennen auf kurzer Basis, deren Einmessung bekannt ist. Nach Lösung der Mehrdeutigkeiten auf der Basis wird der aus der GPS-Lösung berechnete Differenzvektor im WGS84 zur Ableitung des Kurswinkels genutzt. Mit diesem Kurswinkel wird die inertielle Einheit gestützt, so dass zum einen eine rein autonome Kurswinkelausrichtung des inertialen Messsystems vermieden wird und zum anderen die Messungen der Kreisel permanent gestützt werden. Die Genauigkeiten des TSS POS/MV 320 sind in der Tabelle 7.4 angegeben. Desweiteren bietet das TSS POS/MV die Möglichkeit der Positionsbestimmung mit Mehrdeutigkeitslösung referenziert auf einen stationären Empfänger an. Mit dem verfügbaren Instrumentarium war eine solche Lösung jedoch nicht möglich.

Bei dem Heave-, Roll- und Pitch-Sensor TSS 335B handelt es sich um ein ungestütztes inertiales Messsystem, das aus drei orthogonal zueinander angeordneten Beschleunigungsmessern sowie drei ebenfalls orthogonal zueinander angeordneten Drehratensensoren besteht. Die Genauigkeit wird mit 0.15° für die Neigungswinkel angegeben. Das TSS 335B liefert in der Praxis die erforderlichen Schiffslagedaten zur Korrektur der Tiefenwerte. Es ist fest an Bord des *VWFS Deneb* installiert. Beim Einbau in der Werft wurde er aufwendig auf die mittlere Rollachse des Schiffes ausgerichtet.

Die drei *Ashtech* GPS-Antennen des COMPASS-Systems sind so installiert, dass quer zur Fahrtrichtung eine Basislänge von 10.43 m (hauptsächlich zur Bestimmung des Rollens) und längs der Fahrtrichtung von 19.20 m (hauptsächlich zur Bestimmung des Kurses und des Stampfens) wirkt. Entsprechend der Formel 7.7 und der Tabelle 7.2 sind entsprechend Genauigkeiten von 0.06° für das Rollen und 0.02° für das Stampfen und den Kurs zu erwarten.

Als Beispiel der umfangreichen Untersuchungen werden die Rollbewegungen zweier Manöver des *VWFS Deneb* beschrieben, die in der Abbildung 7.10 dargestellt sind. Zum einen handelt es sich um eine Kurvenfahrt, bei der üblicherweise keine Messungen auf dem *VWFS Deneb* vorgenommen werden, zum anderen um eine "Normale Messfahrt" mit einem kurzen Abstoppen und einem anschließenden Aufnehmen der Fahrt.

Die Kurvenfahrt beginnt mit einer Rechtskurve, deren Scheitelpunkt bei etwa 40 s (siehe Abbildung 7.11) erreicht wird, und einer Linkskurve (Scheitelpunkt etwa bei 320 s). Die Amplituden der Rollbewegung sind in den Scheitelpunkten mit etwa 2° am geringsten, im weiteren Verlauf der Fahrt steigen sie bis auf etwa 18° an. In den Kurven wird das Schiff "nach außen" geneigt, aus hydrostatischen Betrachtungen der Schiffsbewegungen ist entsprechend eine Dämpfung der Rollbewegung abzuleiten. Die Differenzen in der unteren Grafik zwischen COMPASS und POS/MV zeigen einen mittleren Offset von -0.63° bei einer Standardabweichung von 0.22°. Die Schwingungen der Ausgangswerte sind in gedämpfter Form auch in den Differenzen sichtbar, besonders zu den Zeiten mit großen Rollbewegungen. Der Vergleich zwischen COMPASS und TSS 335B-Werten ergibt eine mittlere Abweichung von 0.32° bei einer Standardabweichung von 0.51°. In den Bereichen mit geringen Rollbewegungen sind die Differenzen weniger verrauscht. Das Rauschen wird jedoch stärker von langperiodischen Effekten überlagert. Der Vergleich der

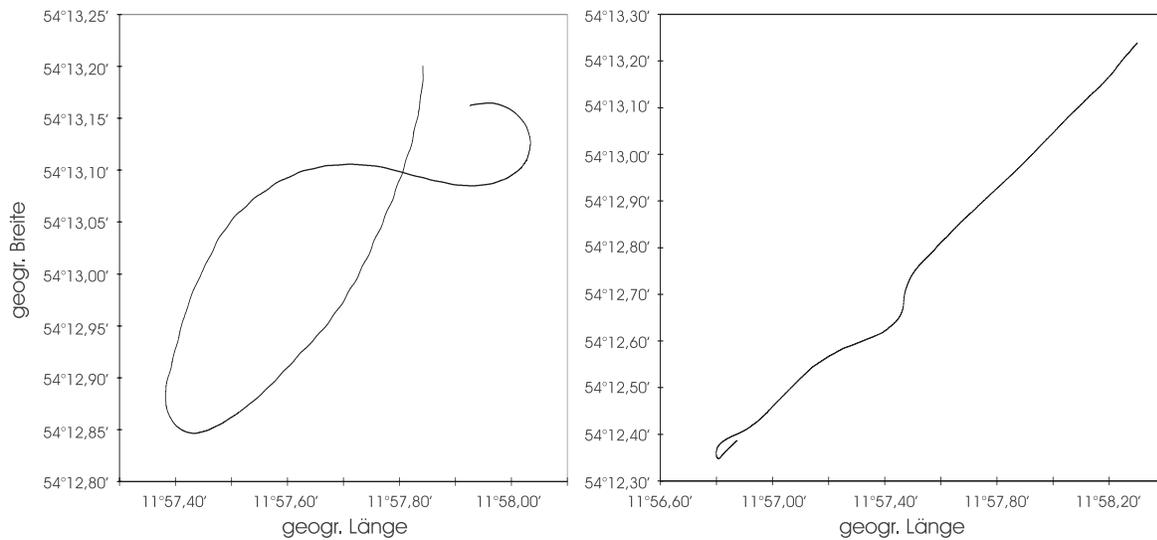


Abbildung 7.10: Kurvenfahrt und "Normale Messfahrt" mit dem *VWFS Deneb* des BSH.

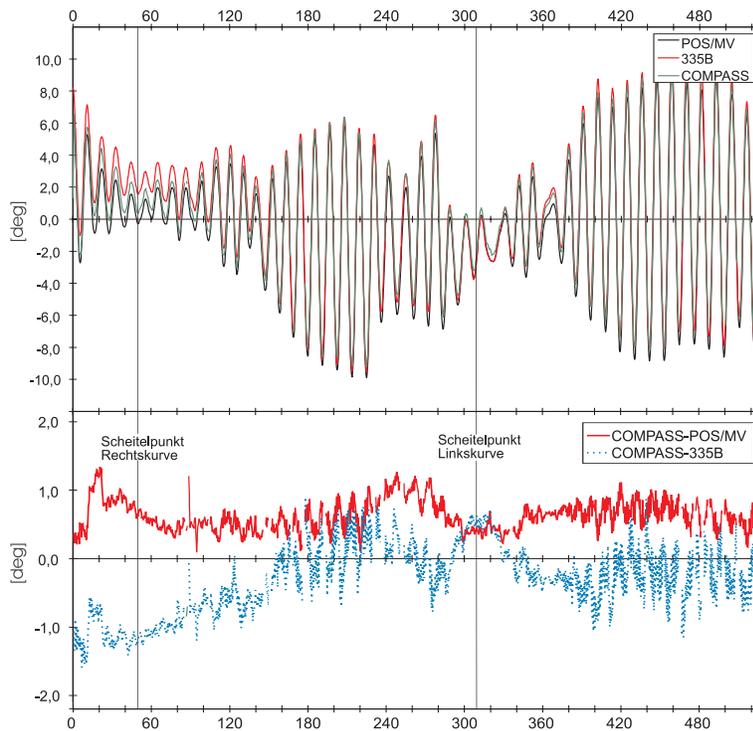


Abbildung 7.11: Kurvenfahrt: Rollbewegung und Differenzen zwischen den Lagemesssystemen TSS POS/MV 320, TSS 335B und COMPASS. Fahrt mit dem *VWFS Deneb* des BSH.

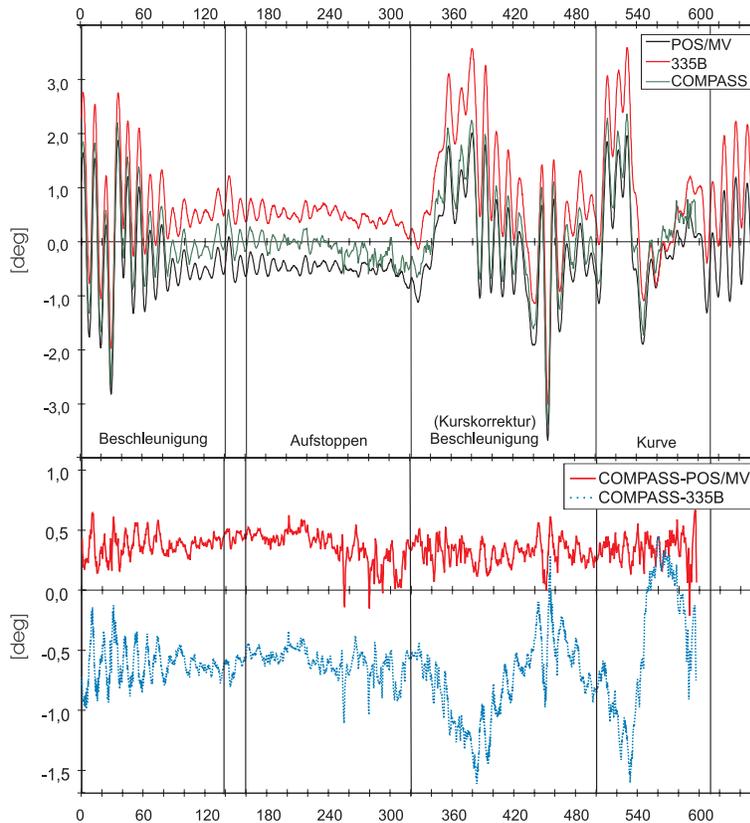


Abbildung 7.12: "Normale Messfahrt": Rollbewegung und Differenzen zwischen den Lagemess-Systemen TSS POS/MV 320, TSS 335B und COMPASS. Fahrt mit dem *VWFS Deneb* des BSH.

Werte bei der Kurvenfahrt unterliegt im Besonderen der Problematik der nicht transparenten Drehreihenfolgen in der Verarbeitungssoftware, wie eingangs des Kapitels 7.4 beschrieben.

In Abbildung 7.12 ist das Rollen bei "normaler Messfahrt" gemessen von den unterschiedlichen Sensoren und die Differenzen zwischen den Messwerten der Sensoren exemplarisch dargestellt. Es traten keine extremen Ruderlagen auf. Das oben abgebildete Manöver begann mit einer beschleunigten Fahrt, die dann aufgestoppt wurde (ab Epoche 160). Danach wurde der Kurs korrigiert (ab Epoche 320) und wieder beschleunigt Fahrt aufgenommen. Nach einer Kurve (ab Epoche 500) wurde wieder das ursprüngliche Profil befahren. Die Schiffsbewegung erreichte Größenordnungen von $\pm 3^\circ$ für die beschleunigten Fahrten und zur Zeit der Kurskorrekturen. Während des Aufstoppens sind nur geringe Rollbewegungen von ca. $\pm 0.5^\circ$ zu erkennen. Die Standardabweichung der Abweichungen zwischen POS/MV und COMPASS errechnen sich zu $\pm 0.11^\circ$, die der Abweichungen zum TSS 335B zu 0.32° . Es zeigt sich, dass die GPS-Stützung des TSS POS/MV deutliche Vorteile besonders bei größerer Dynamik gegenüber dem TSS 335B aufzeigt. Zusätzliche Beschleunigungen bei Manövern, wie z.B. Kurvenfahrten, können durch die GPS-Stützung kompensiert werden. Die Vorteile inertialer Messsysteme, wie die höhere Datenrate und die Unabhängigkeit von Abschattungen in Häfen und durch Schiffsaufbauten, können in einem GPS/INS integrierenden System voll genutzt werden. Weitere Ergebnisse mit diesem Aufbau werden in [Eichhorn 1998] beschrieben.

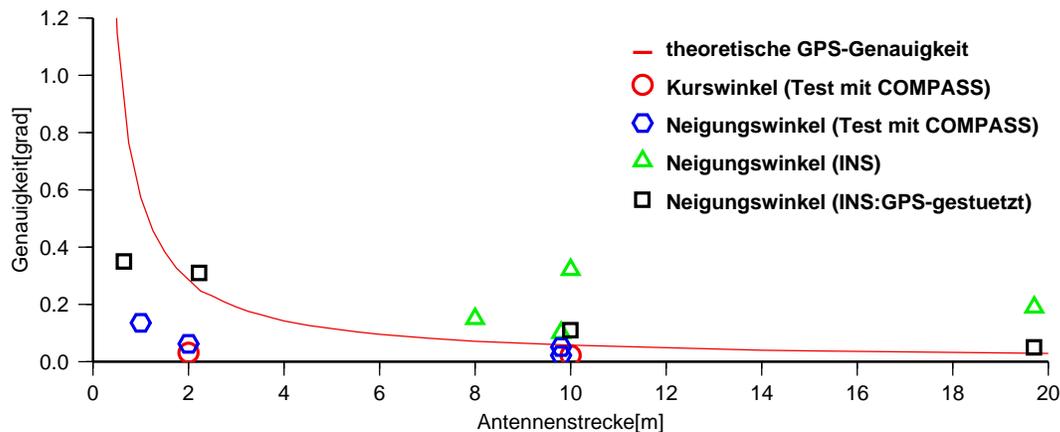


Abbildung 7.13: Theoretisch nach Formel 7.7 erreichbare Winkelgenauigkeiten in Abhängigkeit der "wirksamen" Basislängen zwischen den GPS-Antennen (mit Querabweichung $dq = 0.01$ m) und Standardabweichungen aus Differenzen zu inertialen Systemen und Sollwerten in den statischen Testaufbauten.

7.4.2 Zusammenfassende Betrachtungen

Neben den beschriebenen Untersuchungen wurden weitere Testmessungen auf anderen Schiffen und auch mit statischen Aufbauten durchgeführt. In der Abbildung 7.13 sind die theoretisch nach Formel 7.7 erreichbaren Genauigkeiten (Querabweichung $dq = 0.01$ m) und die ermittelten Ergebnisse dargestellt. Zum großen Teil handelt es sich um Untersuchungen mit den inertialen Messsystemen TSS 335B, TSS POS/MV 320 und dem LCR-88 von Litef. Bezüglich der Vergleiche mit inertialen Messeinheiten werden nur Ergebnisse gezeigt, die unter realistischen Messbedingungen für hydrographische Vermessungen entstanden sind. Untersuchungen mit gezielt hohen Dynamiken wurden nicht dargestellt.

Auf dem Messdach des Geodätischen Instituts der Universität Hannover wurde an mehreren Tagen auf Pfeilern ein Antennenfeld bestehend aus drei GPS-Antennen fest installiert und in Echtzeit mit COMPASS ausgewertet. Ebenfalls unter statischen Bedingungen wurde ein Kreuz mit Seitenlängen von 1.44 m getestet. Die wirksame Basislänge des Kreuzes für den Kurs beträgt entsprechend 2 m.

Die Ermittlung der Kurswinkel gelingt in den Untersuchungen wie erwartet genauer als die der Neigungswinkel, da der Kurs nur aus den horizontalen Komponenten der GPS-Lösungen abgeleitet wird. Die Untersuchungsergebnisse aus Vergleichen mit ungestützten INS liegen alle deutlich über der theoretisch ermittelten Genauigkeitskurve. Die Differenzen zwischen COMPASS und dem GPS-gestützten TSS POS/MV 320 entsprechen den Genauigkeitsannahmen.

Es kann abgeleitet werden, dass eine Lagebestimmung bei ruhigen Messfahrten mit den eingesetzten inertialen Sensoren mit einer Genauigkeit von 0.1° gelingt. Bei höherer Dynamik ist eine GPS-Stützung der inertialen Systeme ratsam. Bei dem GPS-Lagemesssystem COMPASS ist mit der eingesetzten Ausrüstung eine Genauigkeit von 0.1° ab einer Basislänge von etwa 2 m möglich, aber nicht in allen Fällen nachweisbar. Aus der pessimistischeren theoretischen Herleitung mit einer Querabweichung von $dq = 0.01$ m ergibt sich die geforderte Genauigkeit erst über eine Basislänge von 5.72 m.

7.5 Untersuchungen zur GPS gestützten INS Positionsbestimmung

Ausgehend von einer auf GPS basierenden Positionsbestimmung für hydrographische Auswertesysteme kann die zusätzliche INS-Positionsbestimmung die folgenden vier Einsatzmöglichkeiten bieten:

- Positionsbestimmung mit einer höheren Datenrate als die des GPS-Messsystems. INS liefern üblicherweise Daten mit einer Rate von 50 Hz bis 200 Hz, GPS mit 1 Hz bis 10 Hz.
- Genauere Navigationslösung. Das Datenalter der GPS-Lösung kann bei präzisen RTK-Lösungen mehrere Sekunden betragen, bei INS-Systemen liegt es üblicherweise unter 1 s. Für eine präzise Navigationslösung (dm-Genauigkeit) in Echtzeit muss eine GPS-Lösung prädictiert werden, während eine INS-Messung direkt verfügbar ist. Derartige hohe Genauigkeiten sind mit INS- Systemen nur mit Stützung durch externe Sensoren möglich.
- Überbrücken von GPS-Datenlücken bei Total-Messausfall der GPS-Bordanlage oder Abschattungen an den Bordantennen, gegebenenfalls auch bedingt durch den Ausfall des Korrekturdatensignals der Referenzstation.
- Stützung bei der Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten bei auftretendem Verlust der Phasenbeziehungen (*cycle slips*) durch Verringerung des Mehrdeutigkeits-Suchraumes. Zur direkten Ableitung der Mehrdeutigkeiten aus den INS-Positionsinformationen sollte die Position mit besser als $0.5 * \lambda \approx 10$ cm für mindestens 5 s bekannt sein.

Zur Untersuchung der GPS-gestützten Positionsbestimmung mit dem inertialen Messsystem LCR-88 wurde im März 1998 eine Messfahrt des Vermessungsschiffes (VS) *Greif* des WSA Cuxhaven begleitet. Zur GPS-Positionsbestimmung wurde die SAPOS-Station Cuxhaven der LGN als Referenzstation herangezogen. Abbildung 7.14 zeigt einen Teil der Messfahrt als 2-D- und Höhen-Darstellung. Zu sehen sind zwei Profildfahrten in Ost-West-Richtung. Durch das ablaufende Wasser der Gezeitentide senkt sich das Schiff um etwa 70 cm. Die Fahrtgeschwindigkeit erreicht etwa 6 m/s. Das Rollen beträgt strömungs- und wetterbedingt je nach Fahrtrichtung etwa 0.5° bzw. -3.0° und variiert um etwa $\pm 0.3^\circ$. Zur GPS-Positions- und Lagebestimmung wurden vier L1/L2 GPS-Empfänger *Ashtech Z-12* mit Antennen vom Typ *Geodetic II* und *Marine B* eingesetzt. Aufgrund des Aufbaus auf dem *VS Greif* wird der Kurs- und der Rollwinkel auf einer Basislänge von nur 2.22 m und der Stampfwinkel auf 0.65 m gemessen. Die nach den Vorgaben in Tabelle 7.2 theoretisch erreichbaren Genauigkeiten betragen 0.18° für den Kurs, 0.26° für den Roll- und 0.62° für den Stampfwinkel. Die GPS-Antennen waren von diversen Abschattungen durch Schiffsaufbauten betroffen.

Die Drehraten des untersuchten Fahrtabschnitts variierten für den X-Kanal um etwa $\pm 1.0^\circ/\text{s}$, für den Y- und Z-Kanal um etwa $\pm 0.6^\circ/\text{s}$. Die Werte der Beschleunigungsmesser erreichten Beträge von etwa ± 1 m/s² auf allen Kanälen. Die Rohdaten sind in Abbildung 7.15 dargestellt.

Der Vergleich der Lagewinkel aus COMPASS und aus dem LCR-88 ergab für die Differenz der Kurswinkel eine Drift von etwa $+1^\circ$ bis -2.0° , für den Rollwinkel eine mittlere Abweichung von -0.75° mit einer Standardabweichung von 0.35° und für den Stampfwinkel eine mittlere Abweichung von -1.25° mit einer Standardabweichung von 0.32° . Somit ergibt sich der Rollwinkel schlechter als theoretisch erwartet, während Kurs und Stampfen den Erwartungen entsprechen.

Das mit dem LCR-88 eingesetzte Programm AG_IFE beziehungsweise die für Anwendungen im Postprocessing konzipierte Variante AG_IFE_P geben die Position des INS-Zentrums zum

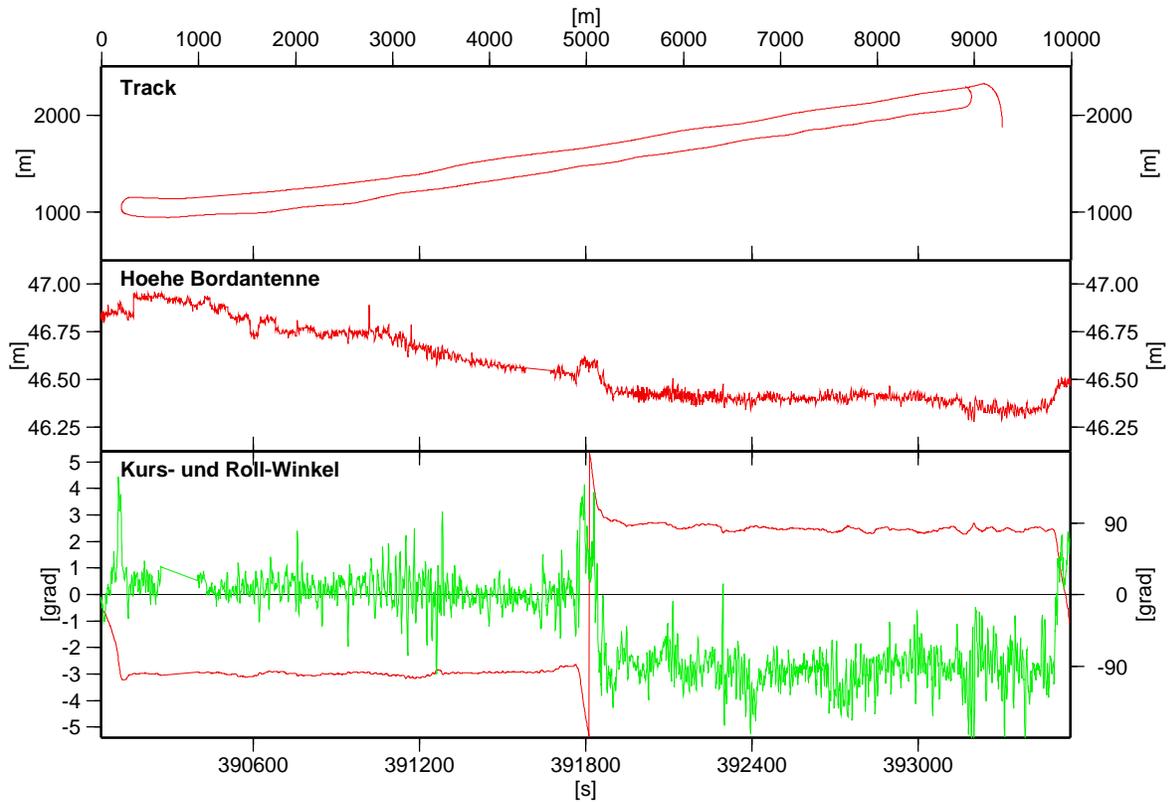


Abbildung 7.14: Abschnitt einer Messfahrt mit dem *VS Greif* der WSA Cuxhaven; 2-D-Position in Nord- und Ostkomponente, Höhe, Rollen und Kurs gegenüber GPS-Zeit.

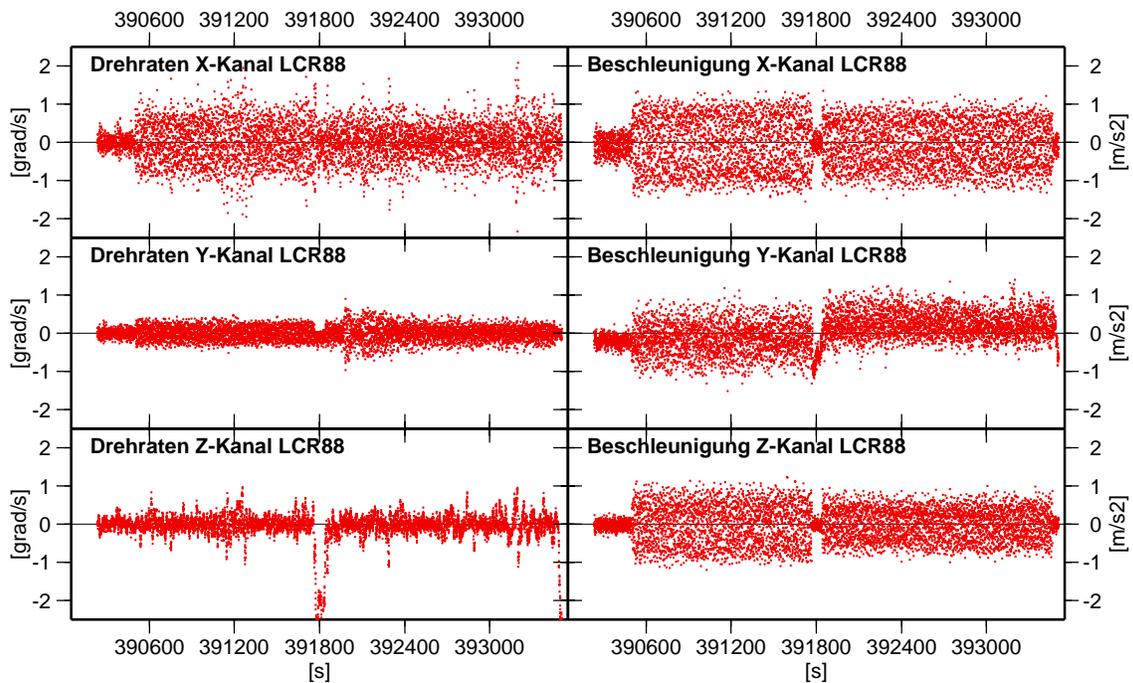


Abbildung 7.15: INS-Rohdaten gegenüber GPS-Zeit eines Teilabschnitts der Messfahrt mit dem *VS Greif* des WSA Cuxhaven.

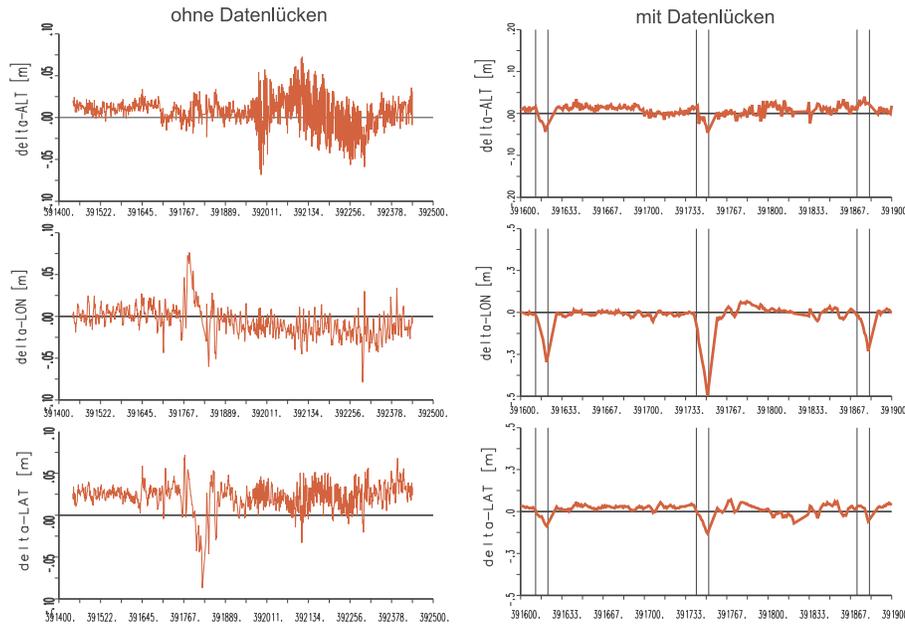


Abbildung 7.16: links: Differenzen zwischen INS- und GPS/COMPASS-Position in [m]; Postprocessing ohne GPS-Datenlücken; rechts: Differenzen zwischen INS- und GPS/COMPASS-Position in [m]; Postprocessing mit Simulation von GPS-Datenlücken (beispielhaft hier: 10 s-Datenlücken); Fahrt mit dem *VS Greif* der WSA Cuxhaven.

Länge der Datenlücke	Höhe	quer zur Fahrtrichtung	in Fahrtrichtung	radial
0 s	2 cm	1.5 cm	1 cm	2.5 cm
3 s	6.5 cm	14.6 cm	5.8 cm	18.9 cm
5 s	9.5 cm	11.7 cm	9.7 cm	20.7 cm
10 s	9.4 cm	40.8 cm	17.6 cm	49.2 cm

Tabelle 7.5: Auswirkung von GPS-Datenlücken auf die INS-Positionsbestimmung; Simulation im Postprocessing mit dem Programm AG_IFE_P; Fahrt mit dem *VS Greif* der WSA Cuxhaven.

Zeitpunkt der INS-Messungen aus. Diese wurden mit hochpräzisen GPS-Positionen verglichen, die mit COMPASS-Lagewinkel auf das INS-Zentrum transformiert wurden. Um zeitgleiche Werte vergleichen zu können, wurden die INS-Koordinaten auf die GPS-Messepochen (volle GPS-Sekunden) interpoliert. Mit Hilfe dieses Aufbaus soll die Leistungsfähigkeit des INS bei der Überbrückung von GPS-Positionsdatenlücken überprüft werden. Dazu werden in mehreren Versuchen im Postprocessing unterschiedlich lange GPS-Ausfälle simuliert und die Abdrift der INS-Position in der ungestützten Situation bestimmt. In Abbildung 7.16 ist beispielhaft ein Teil der Abweichungen der INS-Position mit künstlich geschaffenen GPS-Datenlücken von zehn Sekunden Länge dargestellt. Die Zeitmarken entsprechen dem Beginn und Ende der Datenlücken.

Die zusammenfassenden Ergebnisse der Datenlückenuntersuchung für die Fahrt auf dem *VS Greif* sind in der Tabelle 7.5 und in Abbildung 7.17 dargestellt. Im Wesentlichen erreichen die Abweichungen nach 10 s ungestützter INS-Beobachtungen im Mittel 9 cm für die Höhenkomponente (obere Grafik), 41 cm quer zur Fahrtrichtung (mittlere Grafik) und 18 cm in Fahrtrichtung (untere Grafik). Die quer zur Fahrtrichtung ermittelten Abweichungen lassen sich auf den während der Fahrt unzureichend bestimmten Bias des Beschleunigungsmessers in dieser Richtung zurückführen.

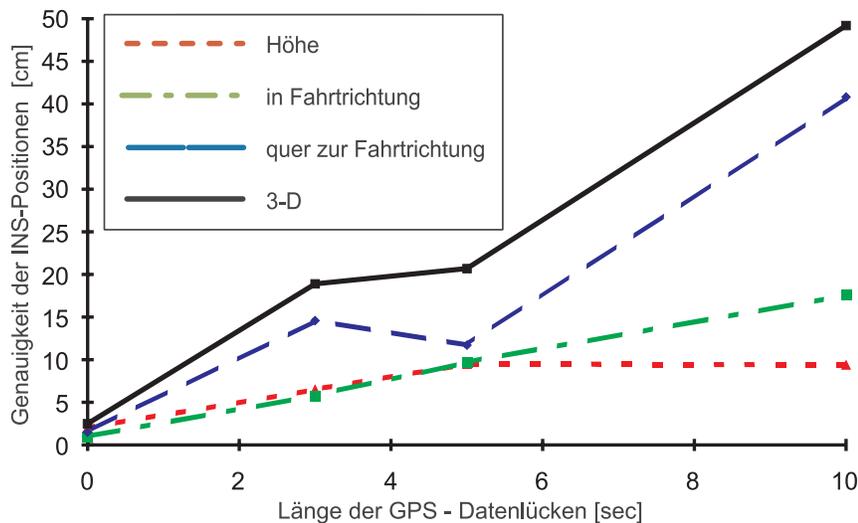


Abbildung 7.17: Auswirkung von GPS-Datenlücken auf die INS-Positionsbestimmung; Simulation im Postprocessing mit dem Programm AG_IFE_P; Fahrt mit dem *VS Greif* der WSA Cuxhaven.

Aufgabe	Untersuchungsergebnis	Folgerung
höhere Datenrate	nicht gegeben	grundsätzlich möglich
genaue Navigationslösung	besser als 2 dm	Nutzung möglich
Überbrückung von Positionslücken	zeitabhängig	mehrere Sekunden möglich
Stützung der Mehrdeutigkeitsuche	max. 1-2 s	nicht ausreichend

Tabelle 7.6: Zusammenfassung zur Nutzung der INS-Positionsbestimmung mit dem LCR-88.

Zusammenfassende Betrachtungen

Ausgehend von diesen Ergebnissen mit einem nicht optimal auf hydrographische Anwendungen abgestimmten System lässt sich ableiten, dass mit geringen Genauigkeitseinbußen von 2 cm die GPS-Position auf 50 Hz bis 100 Hz verdichtet werden kann. Datenlücken von wenigen Sekunden Länge lassen sich überbrücken. Das für RTK-Positionen typische Datenalter von maximal 3 s kann für die Navigation mit einer Genauigkeit von besser als 2 dm auf den für inertielle Messsysteme üblichen Bruchteil einer Sekunde verringert werden.

Zur Stützung der Mehrdeutigkeitslösung ist eine Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von besser als 10 cm gefordert. Diese Genauigkeit kann nur für 1 s bis 2 s angenommen werden. Für eine effektive Anwendung sollte sie jedoch mindestens 5 s gehalten werden können.

Bezüglich der Anforderungen in hydrographischen Auswertesystemen und den oben beschriebenen Anwendungsmöglichkeiten werden die Aussagen für die Positionsbestimmungen mit dem LCR88 mit der Auswertesoftware AG_IFE in der Tabelle 7.6 zusammengefasst.

Die Abbildung 7.18 und die Tabelle 7.5 zeigen die zu erwartenden Positionsabweichungen bei Berechnung mit dem Formelwerk 7.11 bis 7.18. Voraussetzung ist eine unbeschleunigte Geradeausfahrt, die auf normalen Messfahrten nicht gegeben ist. Die Werte sind jedoch für erste Abschätzungen erreichbarer Genauigkeiten bei der Überbrückung von Datenausfällen nutzbar. Für das LCR88 werden die Kenndaten aus der Tabelle 7.3 benutzt, nämlich eine Kreiseldrift

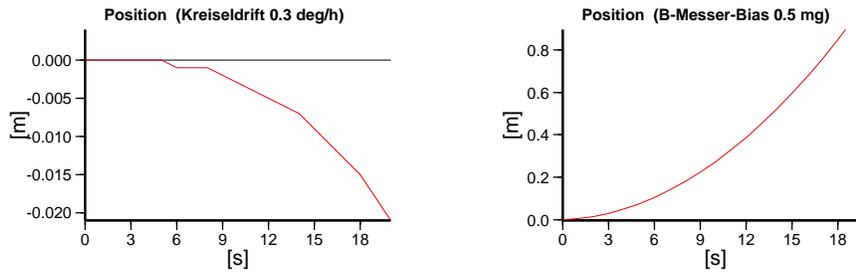


Abbildung 7.18: Schulerschwingungen in der Position für 20 s berechnet mit einem Beschleunigungsmesser-Bias $\nabla_B = 0.5\text{mg}$ beziehungsweise einer Kreiseldrift $\epsilon_g = 0.3^\circ/\text{h}$. Formeln 7.11 bis 7.18. Kenndaten des LCR88 aus Tabelle 7.3.

INS-Art	Einfluss	Sekunden						
		1 s	2 s	5 s	10 s	20 s	30 s	60 s
Kreiseldrift ϵ_g								
INS	$0.001^\circ/\text{h}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
	$0.005^\circ/\text{h}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.009
AHRS	$0.1^\circ/\text{h}$	0.000	0.000	0.000	0.001	0.007	0.023	0.176
	$0.3^\circ/\text{h}$	0.000	0.000	0.000	0.003	0.021	0.068	0.528
	$1.0^\circ/\text{h}$	0.000	0.000	0.001	0.009	0.068	0.226	1.761
Beschleunigungsmesser-Bias ∇_B								
INS	$10 \mu\text{g}$	0.000	0.000	0.001	0.005	0.021	0.046	0.182
	$30 \mu\text{g}$	0.000	0.001	0.004	0.016	0.063	0.138	0.545
AHRS	$500 \mu\text{g}$	0.005	0.015	0.074	0.273	1.042	2.308	9.079
	$1000 \mu\text{g}$	0.01	0.038	0.149	0.546	2.085	4.616	18.158

Tabelle 7.7: Auswirkungen der Schulerschwingung in [m] durch Beschleunigungsmesser-Bias ∇_B und Kreiseldrift ϵ_g auf die Genauigkeit der Positionslösung nach 1 s bis 60 s. Formeln 7.11 bis 7.18.

von $0.3^\circ/\text{h}$ und einem Beschleunigungsmesser-Bias von $500\mu\text{g}$. Die Kreiseldrift zeigt über die kurze Zeit von wenigen Sekunden kaum Auswirkung auf die Positionsbestimmung. Die Beschleunigungsmesser bewirken dem gegenüber Abweichungen von 0.03 m nach 3 s, 0.074 m nach 5 s und 0.273 m nach 10 s. Die Untersuchungen entsprechen in etwa den theoretisch zu erwartenden Genauigkeiten, dies gilt jedoch nicht für die Messungen quer zur Fahrtrichtung.

In Tabelle 7.5 ist die Auswirkung der Schulerschwingung für verschiedene Kenngrößen der inertialen Komponenten aufgeführt. Die Anforderungen an die Kreiseldrift ϵ_g für die Nutzung als INS gibt [Bäumker 1995] mit $0.001^\circ/\text{h}$ bis $0.005^\circ/\text{h}$, für die Nutzung als AHRS mit $0.1^\circ/\text{h}$ bis $1.0^\circ/\text{h}$ an. Die Einstufung für den Beschleunigungsmesserbias wird für INS mit $10 \mu\text{g}$ bis $30 \mu\text{g}$ und für AHRS mit $500 \mu\text{g}$ bis $1000 \mu\text{g}$ angegeben. Mit den präzisen INS-Systemen ist demnach eine Überbrückung von Datenlücken von 10 s mit einer Genauigkeit von 0.5 cm bis 1.6 cm möglich, über 20 s von 2.1 cm bis 6.3 cm und entspricht so teilweise den für diese Arbeit definierten Genauigkeitsanforderungen für die hochpräzise Positionsbestimmung und auch den Anforderungen für ein System zur Unterstützung der Mehrdeutigkeitssuche nach Verlust der Trägerphasenmehrdeutigkeiten. Über längere Zeiträume von bis zu 60 s stehen auch präzise Navigationsinformationen mit einigen Dezimetern Genauigkeit zur Verfügung.

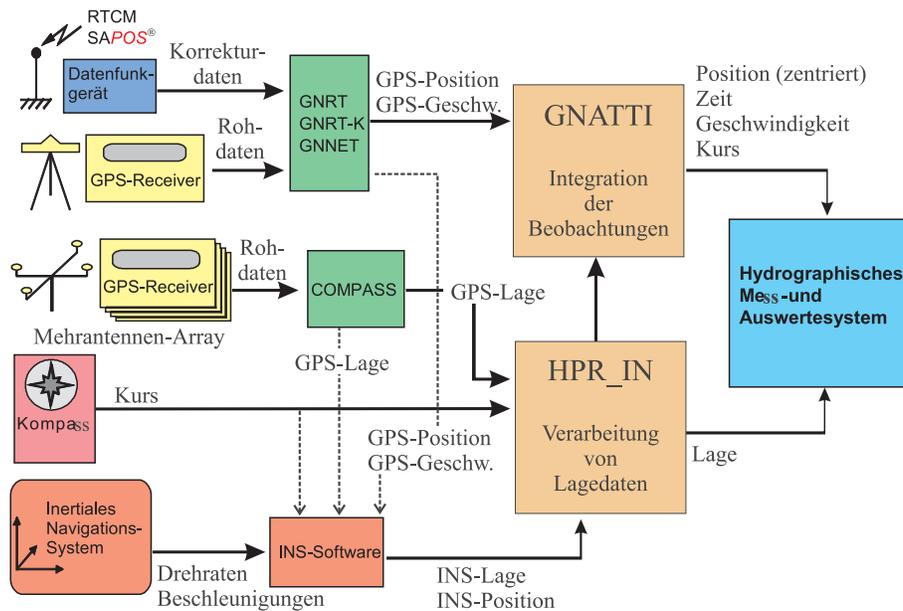


Abbildung 7.19: Zusammenführung der Positions- und Lagedaten zur Nutzung in einem hydrographischen Messsystem.

7.6 Integration der Messdaten in Echtzeit

An Bord eines Messschiffes werden vielfach mehrere Sensoren zur Bestimmung von Positions- und Lageinformationen betrieben, die zum Zwecke der Beschickung und Reduzierung hydrographischer Zielgrößen genutzt werden können. Dies können neben den Ergebnissen der GPS-Positions- und Lagebestimmung Kompasssysteme zur Kursbestimmung und inertielle Messsysteme sein. Die Zusammenführung aller nutzbaren Daten wird beispielhaft in Abbildung 7.6 dargestellt. Parallel zu den in diesem Kapitel 7 beschriebenen Untersuchungen wurden die Programm-Module *hpr_in* und *gnatti* entwickelt, die die Integration der Daten in der GNRT-Software unterstützen (siehe Kapitel 3.4.2).

Das Modul *hpr_in* (von: *heading*, *roll* und *pitch*) sieht das Einlesen der Lagedaten wahlweise über serielle Rechner-Schnittstellen (RS-232), *shared-memory* oder rechnerinterne Schnittstellen (*pipes*) vor. Das Einlesen der Daten über *shared-memory* und *pipes* ist bei Anwendungen möglich, die auf dem Betriebsrechner oder in einem vernetzten Rechner in einer unterstützten Struktur gegeben sind. Unter anderem auf NMEA-basierende Schnittstellenformate gewährleisten eine breit gefächerte Palette einbindbare Sensoren. Genutzt werden können die folgenden Informationen:

- Sensor-Zeit,
- Differenz zur GPS-Systemzeit,
- Datenalter,
- 3-D-Positionen in einem unterstütztem Bezugssystem,
- Geschwindigkeiten,
- Orientierungswinkel (Kurs, Rollen, Stampfen) und
- Genauigkeitsangaben zu Positionsangaben, Geschwindigkeiten und Orientierungswinkeln.

Die Synchronisation der Positions- mit den Lagedaten wird durch die GPS-Zeitzuordnung in *hpr_in* gewährleistet. Durch sensortypische, unterschiedliche Datenalter fallen die Informationen jedoch nicht synchron im Rechner an, sondern können bezüglich ihrer Verarbeitung um bis zu wenige Sekunden zueinander variabel differieren. In *hpr_in* werden alle eingehenden Daten mit einem GPS-Zeitstempel versehen.

Die Ausrichtung der Sensorenachsen entspricht in der Regel nicht denen der für die Zentrierung der Positionen benötigten Einmessungsachsen. Die Abweichungen können in Kalibrierungsverfahren ermittelt und mit ihren Standardabweichungen in *hpr_in* berücksichtigt werden. Für die weitere Verarbeitung legt *hpr_in* im *shared-memory*-Bereich eine HPR-Struktur mit

- GPS-Zeit,
- Datenalter,
- Orientierungswinkel (Kurs, Rollen, Stampfen) und
- Genauigkeitsangaben zu den Orientierungswinkeln (mit Korrelationen)

an. Sind keine Zeitinformationen gegeben, muss das Datenalter der Informationen geschätzt werden. Die Zeitzuordnung wird über einen GPS-Zeitstempel bei Anliegen der Daten an der Schnittstelle herbeigeführt, das Datenalter wird entsprechend berücksichtigt.

Gnatti (sprich: *g-n-atti*) verknüpft die Daten verschiedener Sensoren. Es wird auf die Informationen in den GNRT-Strukturen SOL (Positionen, Geschwindigkeiten) und HPR (Lagewinkel) zurückgegriffen. Die Sensorpositionen werden mit Hilfe der Lagewinkel auf frei wählbare Plattformpunkte zentriert. Voraussetzung ist die konsistente Einmessung der Sensoren und Zielpunkte im Schiffssystem. Die Koordinaten der Einmessungen werden mit ihren Standardabweichungen und Benennungen in die Stationsliste von *gnatti* eingetragen oder aus einer ASCII-Datei eingelesen.

Die Ergebnisse aller transformierten Plattformpunkte werden in Form von SOL-Strukturen im *shared-memory* mit dem *owner GNATTI* und der *rcv_id NAME* bereitgestellt und beispielsweise mit *nav_out* ausgegeben. Näheres hierzu siehe im Abschnitt 3.4.2.

Mit *gnatti* kann die Ausgabe der Daten wahlweise zu den Zeiten der HPR- oder der SOL-Ereignisse erfolgen. Üblicherweise sind die SOL-Ereignisse maßgebend und werden daher primäre Ereignisse genannt. Die Ergebnisse der sekundären Ereignisse werden auf die primären interpoliert beziehungsweise prädiert. Hierzu ist die Verwendung von kubischen Splines oder die Verarbeitung mit einem Kalman-Filter möglich. Die sekundären Ereignisse müssen in diesem Fall für wenige Sekunden vorgehalten werden, bis sie interpoliert werden. Die Ausgabe der Ergebnisse wird zusätzlich zu dem Datenalter der primären Daten um die notwendige Rechenzeit in *gnatti* verzögert.

Das Programmmodul *gnsols* bietet die Möglichkeit, Koordinaten aus den SOL-Strukturen so zu kombinieren, dass bei dem Auftreten einer Datenlücke in einer führenden primären SOL-Struktur die Ausgabe einer weiteren SOL-Struktur erfolgt. *gnsols* legt ebenfalls eine SOL-Struktur mit *owner* und *rcv_id* an. Für die beschriebenen Anwendungen kann beispielsweise bei vollem Verlust der Phasenmehrdeutigkeiten die Ausgabe der präzisen DGPS-Position durch die SOL-Struktur eines INS, einer weniger präzisen DGPS-Position oder eines beliebigen anderen Systems ersetzt werden, um die Positionsaufgabe -gegebenfalls mit verminderter Genauigkeit- weiter erfüllen zu können.

Mit *nav_out* und *hpr_out* werden die Ergebnisse der Positions- und Lagebestimmung in wählbaren Formaten ausgegeben. Neben Spezialausgaben werden auch verschiedene NMEA-Formate unterstützt. Die Daten werden wahlweise auf dem Bildschirm oder auf serielle Rechner-Schnittstellen (RS-232) ausgegeben, in Dateien abgespeichert oder auf rechnerinternen Schnittstellen (*pipes*) zur Verfügung gestellt.

Kontrolle der Positionslösungen

Die beschriebene konzeptionelle Integration erlaubt den Vergleich der Positionslösungen verschiedener Sensoren beziehungsweise den Vergleich mehrerer Lösungen für einen GPS-Sensors. Um die Richtigkeit der Positionsbestimmung in Echtzeit nicht nur anhand der Varianzen evaluieren zu können, können auf der Ebene der Analyse der Koordinaten verschiedene Vorgehensweisen genutzt werden, um die GPS-Mehrdeutigkeitslösung zu überprüfen und eingeschränkt auch, um Genauigkeiten abschätzen zu können. Als solche Vorgehensweisen sind denkbar:

- *Reset* der ersten Festsetzung der Mehrdeutigkeiten und Vergleich mit der Lösung einer zweiten Festsetzung.
- Vergleich zweier Echtzeitlösung derselben Antenne, wobei die Mehrdeutigkeiten einer Lösung kontinuierlich nach wenigen Sekunden verworfen und neu festgesetzt werden.
- bei Nutzung von mindestens zwei GPS-Empfängern: Vergleich der Echtzeitlösung der Antennen durch Analyse der invarianten Zwischenantennenstrecke oder durch Transformation der Positionen über Lagewinkel auf einen Punkt (ggf. auch eine der Antennen).
- Nutzung verschiedener Referenzstationen zur Mehrdeutigkeitsbestimmung.
- Vergleich mit weiteren, genügend genauen Sensoren (INS).

Eine negative Testentscheidung führt dann zu einer Überprüfung der an den Lösungen beteiligten Sensoren und gegebenenfalls zur Neuinitialisierung der Messung mit Warnung an den Nutzer des Systems.

7.7 Fazit

An Bord eines Messschiffes werden Lagewinkel unter anderem für die Zentrierung der GPS-Position auf einen hydrographischen Sensor (z.B. Echolot) und -falls erforderlich- für die Zentrierung von Phasenzentrumsvariationen der GPS-Empfängerantenne benötigt.

Die Genauigkeit der Lagewinkelbestimmung mit einem GPS-Multiantennensystem ist insbesondere abhängig von der Länge der Basis zwischen den Antennen. Untersuchungen haben ergeben, dass eine Basislänge von etwa 5 m für eine Winkelgenauigkeit von 0.1° ausreichend ist. Ein Vergleich mit INS-Systemen ergab, dass eine Stützung der inertialen Messsysteme mit GPS-Geschwindigkeiten und GPS-Lagewinkel eine Verbesserung der Winkelgenauigkeit zur Folge hat. Langperiodische Driften der INS können mit GPS-Lösungen reduziert werden.

Mit dem verwendeten INS können die GPS-Positionen mit 50 Hz bis 100 Hz mit geringen Genauigkeitseinbußen von 2 cm bestimmt werden. Datenlücken von wenigen Sekunden Länge lassen sich mit Dezimetergenauigkeit überbrücken. Das für RTK-Positionen typische Datenalter von maximal 3 s kann für die Navigation mit einer Genauigkeit von besser als 2 dm auf den für inertiale Messsysteme üblichen Bruchteil einer Sekunde verringert werden. Mit qualitativ hochwertigeren INS lassen sich bessere Ergebnisse erzielen.

Die Kombination verschiedener Komponenten in einem Multisensorsystem erfordert die Bereitstellung der Messdaten auf einer gemeinsamen Zeitbasis über definierte Schnittstellen. Die hier vorgestellte Lösung, die in dem Echtzeitpaket GNRT realisiert wurde, nutzt ein Programm zum Einlesen der Daten über Hardwareschnittstellen oder rechnerinterne Strukturen, versieht die eingehenden Daten mit einem Zeitstempel und korrigiert sie um bekannte Offsets. Die derart bereitgestellten Sensorinformationen werden mit einem weiteren Programm mit den GPS Positionsdaten zusammengeführt, mit dem die Zentrierung der GPS-Daten auf beliebige, eingemessene Sensoren an Bord der Plattform vorgenommen werden kann. Das Gesamtsystem kann so abgestimmt werden, dass bei Ausfall eines Systems ein anderes die Positions- oder Lagebestimmung liefert. Bei ausreichender Konfiguration des Messsystemaufbaus lässt sich eine Erhöhung der Sicherheit mit Kontrollen der GPS-Lösungen durch den Vergleich mit anderen Lösungen erreichen.

Mit dem vorgestellten System lassen sich eine Vielzahl von Multisensorsystemen an Bord von Messplattformen zusammenstellen. Voraussetzung ist die einheitliche Definition der Schnittstellenformate (meist NMEA), die bei Bedarf auch auf spezielle Anforderungen abgestimmt werden kann, sofern die Formate der Sensoren dokumentiert sind.

Kapitel 8

Zukünftige Entwicklungen der GNSS-Systeme

In Kapitel 2 wird angemerkt, dass der Fortbestand der Systeme zur Positionsbestimmung in marinen Anwendungen ggf. über Jahrzehnte hinweg eine wichtige Eigenschaft ist, um die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt zu gewährleisten. Im Folgenden soll die zukünftige Entwicklung globaler Navigationssysteme beschrieben werden, soweit sie sich heute absehen lässt.

8.1 Das NAVSTAR Global Positioning System (GPS)

Die Anforderungen an GPS werden in den *GPS Operational Requirements Document* (ORD) des *Joint Requirements Oversight Councils* und des *U.S. Air Force Chief of Staff* sowohl für den militärischen als auch für den zivilen Bedarf spezifiziert. Die militärische Nutzung fordert die permanente Verfügbarkeit des GPS in allen Konfliktlagen, während die zivile Nutzung unter ökonomischen Aspekten die Verbesserung der Positions-, Geschwindigkeit- und Zeitinformation in komplexen Navigations- und Kommunikationssystemen anstrebt.

Das GPS *Joint Program Office* (JPO, Los Angeles Air Force Base, USA) setzt die Anforderungen des ORD in ein technisches Konzept um. Hier werden die Verbesserungen des Kontrollsegments im *Architecture Evolution Plan* (AEP) und in der *Accuracy Improvement Initiative* (AII) vorgenommen. Das Raumsegment wird schrittweise über verschiedene Generationen von Satelliten dem aktuellen Stand der Entwicklung und den Anforderungen des ORD angepasst.

Für das Kontrollsegments sind nach [Rafferty et al. 2000] und [Fontana et al. 2001] folgende Verbesserungen vorgesehen:

- Verbesserte Parameterbestimmungsprozesse durch Ergänzung der Monitorstationen durch die US amerikanischen Stationen der *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA).
- Verbesserung der Broadcast Navigationsinformationen durch vermehrtes Upload der Daten auf *Remote Tracking* Stationen (RTS) des *Air Force Satellite Control Networks* (AFSCN). Die Satellitenbahnen können durch das geringere Datenalter und die zusätzlichen Informationen besser parametrisiert werden.
- Verbesserung der Zeitinformationen jedes Satelliten durch Zeitkorrekturbits.
- Neue Sicherheitsarchitektur der Satelliten für die *Precise Positioning Service* (PPS)-Nutzer.

Die Modernisierung des Raumsegments sieht vor, dass

- zwei zivile Codes (CM, C1) auf L2 (*L2 Civil Signal*, L2C),
- ein M-Code Signal auf L1 und L2 und
- ein L5-Signal für sicherheitsrelevante (*safety of life*) Anwendungen

hinzugefügt werden.

Zunächst war geplant, in einer ersten Phase auf der L2-Frequenz ein dem C/A-Code auf L1 identisches Signal aufzuzumulieren [Rafferty et al. 2000]. Laut [Fontana et al. 2001] wurde kurzfristig umdisponiert und ein neues ziviles L2-Signal L2C entwickelt, das mit einem CM- (*moderate length code*) und einem CL-Code (*long code*) ausgestattet wird. Die ersten entsprechend umgerüsteten Block IIR-M-Satelliten werden wahrscheinlich im Jahre 2003 ausgeliefert und bis 2006 in das Raumsegment eingegliedert. Insgesamt sollen zwölf der 21 Block IIR-Satelliten mit den Ergänzungen ausgestattet werden.

Der M-Code wird dem L1 und L2 hinzugefügt und erlaubt den Nutzern des *Precise Positioning Services* (PPS) einen schnelleren Zugang zu geheim codierten Signalen. Die Entwicklungen werden vermutlich im Jahr 2008 vorläufig und im Jahr 2010 endgültig vollständig verfügbar sein.

In einer zweiten Phase werden sechs Block IIF-Satelliten mit den oben beschriebenen Funktionalitäten der modernisierten Block IIR-M-Satelliten ausgestattet. Zusätzlich wird ein L5-Signal mit einer Frequenz von 1176.45 MHz ($\lambda \approx 25.5$ cm) hinzugefügt. Das Signal soll sicherheitsrelevanten Flugverkehr- und *Search-And-Rescue* (SAR)-Anwendungen gerecht werden. Die ersten Satelliten sollen im Jahr 2005 geliefert werden. Bis zu zwölf Satelliten sollen bis 2009 in das Raumsegment eingebracht werden. Die vorläufige Verfügbarkeit des L5-Signals ist für 2012 geplant, die endgültige für das Jahr 2014.

Alle ORD-Anforderungen sollen mit den Block III-Satelliten erfüllt werden. Die Entwicklungen der Block IIR- und IIF-Satelliten fließen hier ein. Der M-Code wird dabei mit hoher Energie ausgestrahlt werden, um sicherheitsrelevanten Anforderungen gerecht zu werden. Der erste Flug eines Block III-Satelliten ist für das Jahr 2008 geplant.

[McDonald 2001] erwartet als Folge der Modernisierung und der Verbesserung von Algorithmen, dass sich die Genauigkeit der GPS-Positionsbestimmung in den nächsten Jahren um den Faktor 3 bis 10 verbessern wird.

8.2 Das GLObal NAVigation Satellite System (GLONASS)

GLONASS (englische Übersetzung: *GLObal NAVigation Satellite System*) wird von den Russischen Weltraum-Streitkräften (russische Abkürzung: VKS) für die Regierung der Russischen Föderation betrieben. Bei vollem Ausbau besteht das Raumsegment aus 24 Satelliten (21 ständig operabel, 3 Reserve). Der volle Systemausbau wurde in den neunziger Jahren erreicht, konnte aber wegen der geringen Lebensdauer der Satelliten und fehlender Mittel nicht gehalten werden, so dass die Anzahl der operablen Satelliten im Jahre 2001 bis auf unter zehn gefallen ist.

Das Konzept ähnelt dem des GPS, jedoch beziehen sich die Messungen räumlich und zeitlich auf unterschiedliche Systeme. So beziehen sich die GPS-Messungen auf das WGS84 und als Zeitreferenz wird die GPS-Systemzeit verwendet. GLONASS hingegen greift auf das System PZ-90 und die Moskauer UTC-Zeit zurück. Transformationsansätze zwischen den Systemen sind von

verschiedenen Seiten entwickelt worden. Bei der Signalstruktur sind als wesentlicher Unterschied zu dem GPS-System die variierenden Messfrequenzen der GLONASS-Satelliten zu nennen.

Die Genauigkeiten bei vollem Ausbau im Stand-Alone-Betrieb sind besser zu bewerten als die des GPS, da die Signale systembedingt nicht künstlich verschlechtert werden können. Zusätzlich ist die Sichtbarkeit der Satelliten aufgrund der höheren Inklination der Satellitenbahnen für Bereiche nördlich des 50. Breitenkreises generell günstiger als die des GPS. In diesen Bereichen liegen insbesondere die deutschen Küstenregionen.

In einer Mitteilung des russischen Verkehrsministeriums aus dem Jahre 1996 [Tsahk 1996] wurde sowohl der freie Gebrauch für zivile Nutzer als auch der Betrieb des Systems mindestens bis zum Jahr 2010 garantiert (ähnlich wie bei dem GPS-System). Zur Zeit ist jedoch nicht abzusehen, dass GLONASS die volle Operationalität erreichen wird. Russische Pläne sehen den Aufbau einer Konstellation bestehend aus GLONASS-M-Satelliten ab 2004 und danach eine GLONASS-K-Serie mit einer Lebensdauer der Satelliten von 8 und 10 Jahren vor [Müller 2001].

8.3 Europäische Alternativen zu GPS: EGNOS und Galileo

GPS ist durch die hohe Leistungsfähigkeit des Systems in viele Produkte und Systeme integriert worden. Navigationseinheiten, Installationen zur Zeitbestimmung, aber auch geodätische Grundlagennetze basieren auf der Verfügbarkeit des Systems. Für den Fall, dass GPS als militärisches System aus politischen oder anderen Gründen nicht mehr allen Nutzern im vollen Umfang zur Verfügung steht, ist ein immenser marktwirtschaftlicher Schaden zu erwarten. Desweiteren kann GPS im derzeitigen Zustand keine Integrität bieten und die Garantien zur freien Nutzung der Signale erscheinen nicht ausreichend, so dass im Falle des Systemsausfalls auch keine Haftungen übernommen werden können.

Dies führt zu Bestrebungen seitens weiterer Staaten, eigene satellitengestützte Navigationssysteme aufzubauen. Hierzu sind zwei Satelliten des *Beidou Navigation System* (BNS) des chinesischen Militärs zu zählen, die seit Ende des Jahres 2000 in geostationären Umlaufbahnen geflogen werden. Eine ernstzunehmende Konkurrenz beziehungsweise Erweiterung zu GPS und GLONASS ist mit dem EGNOS-Konzept der Europäischen Union und der Installation des Galileo-Systems gegeben.

Das EGNOS-Konzept sieht die Erschließung bestehender Satellitensysteme vor, während für die Ausbaustufe des GNSS-2 die Installation eigener Navigationsatelliten geplant ist. Für die politischen und institutionellen Belange zeichnet sich die Europäische Union (EU), vertreten durch die Europäische Kommission, verantwortlich. Die *Europäische Organisation für die Sicherheit im Luftverkehr* (EUROCONTROL) definiert Anforderungen für die Luftfahrt und nimmt an der Erprobungs- und Validierungsphase teil. Die Aufgaben der Europäischen Weltraumorganisation (*European Space Agency*, ESA) sind die Entwicklung und der Aufbau von EGNOS und die Vorbereitung des GNSS-2. Die drei Institutionen koordinieren die Beiträge zu dem europäischen GNSS in der *European Tripartite Group* (ETG).

8.3.1 GNSS-1/EGNOS

Das Konzept des *European Geostationary Navigation Overlay Service* (EGNOS) ist eine Ergänzung der bestehenden Systeme GPS und GLONASS durch geostationäre Satelliten. Die Kompatibilität zu benachbarten Systemen wie dem amerikanischen *Wide Area Augmentation Service* (WAAS) bleibt erhalten. EGNOS ist als regionale Implementation eines globalen Konzeptes ein-

zustufen [DFNP 1999]. Die Abstimmung der Entwicklungen der Dienste (WAAS und EGNOS) findet in einer internationalen Arbeitsgruppe (*Interoperability Working Group*) statt, zu deren Mitglieder die Europäische Union zählt.

Die Implementierungsphase des Systems wurde im Dezember 1998 begonnen und befindet sich im Jahre 2001 in der Realisierungsphase. Durch die Nutzung von Navigationstranspondern an Bord von INMARSAT III-Satelliten und die kontinuierliche Auswertung eines terrestrischen Netzwerks an Überwachungsstationen sollen schrittweise

- Pseudoentfernungen,
- Integritätsinformationen und
- DGNSS-Korrekturdaten

geliefert werden. Die Aussendung der Signale soll zunächst über dem Indischen Ozean und über dem Atlantik realisiert werden. Die *Advanced Operational Capability* (AOC) ist für 2003, die *Full Operational Capability* (FOC) für 2005 vorgesehen. Auftragnehmer ist ein Konsortium unter Führung der französischen ALCATEL-Gruppe.

Die ersten Tests werden seit Anfang 2000 mit dem *EGNOS System Test Bed* (ESTB) durchgeführt. Das ESTB bestand im Februar 2000 aus acht europaweit verteilten Monitorstationen (*Reference and Integrity Monitors*, RIMS), einem Rechenzentrum (*Central Processing Facility*, CPF) in Norwegen und einer Erd-Raum-Funkstation (*Navigation Land Earth Station*, NLES) in Frankreich. Zur Bestimmung der Bahn- und Uhrenparameter der Navigationseinheit auf dem INMARSAT Satelliten (*Atlantic Ocean Region East*, AOR-E) wurden drei weitere Bodenstationen hinzugezogen. Die GPS/GLONASS/GEO Daten der Bodenstationen wurden an die CPF gesendet. Dort werden *Wide Area Differential*-Korrekturen und Informationen über die Integrität zu jedem Satelliten abgeleitet und an die NLES weitergeleitet. Hier werden die Daten aufgezeichnet, in ein Standardformat gewandelt, auf ein GPS ähnliches Signal aufmoduliert und zu den EGNOS GEO Satelliten gesendet (Uplink).

Die ersten marinen Untersuchungen wurden im Hafen von Genua von dem *Istituto Idriografico della Marina* (IIM) vorgenommen ([Sinapi et al. 2000]). Das IIM verspricht sich vom EGNOS eine kosteneffektive Alternative zu kommerziellen und lokalen DGNSS-Diensten. Statische und kinematische Messungen zeigten Genauigkeiten von etwa 1 m in der geographischen Breite und 2 m in der Längskomponente.

Entsprechend der Konzeption des Systems sind dies realistische Werte. Die Genauigkeiten reichen somit für die Mehrzahl von Navigationsanwendungen aus. Für die hochpräzise Positionsbestimmung bietet EGNOS auf Grund der geringen Genauigkeit keine Alternative.

8.3.2 GNSS-2/Galileo

Die Europäische Kommission hat am 10. Februar 1999 Empfehlungen bezüglich der Schaffung eines globalen Satellitennavigationssystems seitens der Europäischen Union ausgesprochen [EC 1999]. Galileo soll als offenes, globales System konzipiert werden, kompatibel, aber unabhängig zum GPS und mit einer noch zu definierenden Beteiligung von Russland. Die offen gelassene Einbeziehung des GLONASS-Systems ist auf die Unwägbarkeiten des Ausbaus des russischen Weltraumsegments (siehe Kapitel 8.2) zurückzuführen. Die Verkehrsminister der Europäischen Union haben am 26. März 2002 die Finanzierung der Entwicklungsphase beschlossen, in der die

	OAS		CAS1	CAS2	
	Einfrequenz	Zweifrequenz		SAS	SAS-R
Position horizontal	15 m	6 m	6 m	4 m	4 m
Position vertikal 75°S - 75°N	30 m	12 m	12 m		6 m
Position vertikal 90°S - 90°N	35 m	15 m	15 m	10 m	
Geschwindigkeit	0.5 m/s	0.2 m/s	<0.2 m/s	<0.2 m/s	<0.2 m/s
Zeit	<0.1 s	<0.1 s	100 ns	100 ns	100 ns
Verfügbarkeit	99%	99%	99%	99.9%	99.9%
Integrität	RAIM	RAIM	RAIM Bodenstat.	RAIM Bodenstat.	RAIM Bodenstat.

Tabelle 8.1: Leistungsparameter der Galileo-Dienste nach [Weber und Schäfer 2001].

Satelliten und die Bodenkomponente entwickelt werden. Ein erster Versuchssatellit soll spätestens 2004 gestartet werden. In der Errichtungsphase (2006-2007) sollen die Satelliten entwickelt und gestartet und das Bodensegment errichtet werden. Es ist geplant, dass das System ab 2008 voll einsatzfähig ist.

Ziel seitens der EU ist es, sich aus wirtschaftlichen und strategischen Gründen weitgehend unabhängig von dem amerikanischen GPS zu machen. Desweiteren wird mit verbesserten Leistungsparametern für die Genauigkeit, Verfügbarkeit und Integrität sowie neuen Diensten von Galileo argumentiert. Vergleichbare Positionsbestimmungssysteme auf Basis der landgebundenen Mobilkommunikation (z.B. UMTS) müssten in einem Maße verdichtet werden, dass entsprechende Investitionen alleine in Deutschland ein Mehrfaches der gesamten Galileo-Investitionen betragen würden.

Das Weltraumsegments soll aus 30 Satelliten in drei Bahnebenen mit einer Bahnhöhe von etwa 23.000 km und einer Bahnneigung von 56° bestehen. Im vorläufigen Konzept werden vier Galileo-Dienste unterschieden:

- *Open Access Service* (OAS)
Im OAS ist Galileo für jedermann frei verfügbar. Es können zwei Frequenzen genutzt werden. Informationen über die Integrität des Systems sind verfügbar.
- *Controlled Access Service 1* (CAS1)
Für hohe Genauigkeitsanforderungen mit zusätzlichen Integritätsinformationen, die über Bodenstationen gewonnen und übermittelt werden, kann der CAS1 Dienst genutzt werden.
- *Controlled Access Service 2*
Sicherheitskritische (*Safety of Life Service* (CAS2-SAS), eingeschränkt auch öffentlich nutzbar) und strategische Anwendungen (*Governmental Access Service* (CAS2-SAS-R), nur für Regierungszwecke) erfordern eine sehr hohe Positionsgenauigkeit bei gleichzeitig hoher Robustheit des Systems. Die Integrität wird durch Bodenstationen zusätzlich unterstützt.

Weitere Leistungsangaben können der Tabelle 8.1 entnommen werden.

Die geschätzten Kosten liegen bei 3.2 Milliarden Euro bis zum Vollausbau (FOC) im Jahre 2008. Es wird angenommen, dass sich die Investitionen durch die Erschliessung von Mehrwertdiensten für die Informationsgesellschaft in wenigen Jahren amortisiert haben.

8.4 Loran-C/EUROFIX

Zu Beginn des 2. Weltkriegs erkannten die USA und die Briten die Notwendigkeit für Navigationssysteme, die von Schiffen und Flugzeugen auch über große Entfernungen zur Positionsbestimmung genutzt werden können. Seitens der Briten kam es zur Entwicklung des *Gee*-Systems für hochfliegende Flugzeuge. In den USA wurde das Loran-A (*Long-Range-Navigation*) für niedrig fliegende Flugzeuge und Seefahrzeuge im Herbst 1940 geplant und ab Frühjahr 1941 am *Massachusetts Institut of Technology* (MIT) entwickelt. Loran-A war bereits zum Ende des 2. Weltkriegs auf einem Drittel der Erdoberfläche mit 70 Stationen als Navigationssystem nutzbar. Nach verschiedenen Modifikationen wurde 1957 das System Loran-C umgesetzt und seitdem weltweit ausgebaut [Federhen 1993].

Loran-C ist ein terrestrisches Funkhyperbelverfahren mit einer Trägerfrequenz von etwa 100 kHz und einer Bandbreite von 20 kHz. Die vergleichsweise geringe Trägerfrequenz sichert dem Nutzer ein stabiles Signal auch über große Entfernungen, nahezu eine stehende Welle, die nur wenig variiert. Die Reichweite der Stationen ist abhängig von ihrer Sendeleistung und kann 800 nmi bis 1200 nmi (ca. 1500 km bis 2200 km) erreichen. Als absolute Genauigkeit wird in [Federhen 1993] 185 m bis 460 m genannt, die Wiederholgenauigkeit ist abhängig von der Geometrie der Messung zwischen 20 m im Zentrum und 100 m in Randbereichen eines Überdeckungsbereiches. Die Genauigkeit für die relative Positionsbestimmung zweier Plattformen zueinander wird mit 10 m bis 20 m angegeben.

Ab dem 31.12.1994 beendeten die USA offiziell den Betrieb ihrer Überseestationen und überließen die Entscheidung über den Weiterbetrieb den Staaten, in denen die Anlagen installiert waren. 1992 unterschrieben Dänemark, Deutschland, Frankreich, Frankreich, Irland, die Niederlande und Norwegen ein Übereinkommen zum Betrieb eines zivilen Loran-C Netzwerks, das *Northwest Europe Loran-C System* (NELS) zur Überdeckung von Nordwest-Europa und dem Nordatlantik. Als sinnvolle Ergänzung für die Positionsbestimmung bei Anwendungen in Mittel- und Osteuropa nennt [Kügler 1999] eine Kombination von Loran-C und der entsprechenden russischen Variante CHAYKA.

Die Einführung von NELS führte zur Integration von Loran-C und GNSS in Form des Positionierungssystems *Eurofix*. Dabei werden dem Loran-C Signal zusätzlich differentielle GNSS- und Loran-C-Korrekturdaten, aber auch Statusinformationen aufmoduliert. Eine Übersicht über die Verfügbarkeit und Integrität von Positionsinformationen des Eurofix-Systems gibt Tabelle 8.2 nach [Kügler 1999].

Für den Fall, dass keine Loran-C-Station empfangen werden kann, steht dem Nutzer lediglich eine Einzelstations-GPS-Lösung ohne DGPS-Korrekturen zur Verfügung. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung liegt zwischen wenigen Metern bis zu 100 m und ist abhängig von der Geometrie der empfangenen Satelliten und gegebenenfalls Signaldegradationen auf dem GPS-Signal. Für die 3-D-Positionsbestimmung sind generell vier Satelliten notwendig. In marinen Anwendungen ist die Höheninformation üblicherweise auf wenige Meter genau genug bekannt, so dass bereits mit drei Satelliten eine 2D-Position berechenbar ist. Jeder weitere empfangene Satellit erhöht die Genauigkeit der Positionsbestimmung und sorgt durch die Überbestimmung der geometrischen Aufgabe für die Integrität der Messung.

Der Empfang einer einzelnen Loran-C-Station verbessert durch die Übersendung von DGNSS-Korrekturdaten die GNSS-Positionsbestimmung auf eine Genauigkeit von 5 m und besser. An Verfügbarkeit und Integrität der Messung ändert sich jedoch nichts. Bei Empfang von weiteren Loran-C-Stationen können die Signale ebenfalls zur Positionsbestimmung herangezogen werden, so dass ein Mindestmaß an Verfügbarkeit und Integrität mit weniger als vier GNSS-Satelliten

Loran-C Stationen	Anzahl GNSS-Satelliten					
	0	1	2	3	4	5
0	-	-	-	2D	3D 2D+Integrität	3D Integrität
1	-	-	-	2D	3D 2D+Integrität	3D Integrität
2	-	-	2D	3D 2D+Integrität	3D Integrität	3D Integrität
3	2D	2D	3D 2D+Integrität	3D Integrität	3D Integrität	3D Integrität
4	2D Integrität	2D Integrität	3D Integrität	3D Integrität	3D Integrität	3D Integrität

Tabelle 8.2: Verfügbarkeit und Integrität der Positionsinformationen des Eurofix-Systems nach [Kügler 1999]

gegeben ist. Mit Hilfe der DGNSS-Informationen können die Loran-C Messungen kalibriert werden. Dank der günstigen Ausbreitungseigenschaften der Loran-C-Signale sollen mit derart absolut kalibrierten Messungen Genauigkeiten von wenigen Metern auch bei kurzzeitigem Ausfall der GNSS-Messungen erreicht werden. Ein Testausbau bestehend aus vier LORAN-C-Stationen ist 2001 abgeschlossen worden.

Für die hochpräzise Positions- und Lagebestimmung mit cm-Genauigkeit wird Eurofix keine Rolle spielen. Für Navigationsanwendungen ist es bei Ausfall von GNSS-Systemen nutzbar.

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

Schwerpunkt dieser Arbeit ist die regionale, hochpräzise GPS-Positionsbestimmung mit Zentimetergenauigkeit hinsichtlich des Einsatzes in einem mobilen, auf hydrographische Anwendungen ausgerichteten Multisensorsystem in Echtzeit. Die bestmöglichen Genauigkeitsanforderungen für derzeitige und auch zukünftige Anwendungen werden mit etwa 3 cm ermittelt. Ausgehend von dem in Kapitel 3.2 beschriebenen Fehlerhaushalt ist deshalb die Reduzierung sowohl der entfernungsabhängigen als auch der stationsabhängigen Fehleranteile der GPS-Positionsbestimmung notwendig.

Die Reduzierung entfernungsabhängiger Fehleranteile gelingt durch die Nutzung mehrerer Referenzstationen, die das Messgebiet umschließen. Schon bei ersten Untersuchungen im Postprocessing wurden die Mehrdeutigkeiten über 20 km bis 40 km Entfernung bis zu den Referenzstationen bei Nutzung von nur zwei Stationen bedeutend verbessert. Eine Simulation einer Referenzstationsvernetzung anhand realer Daten mit vier Stationen mit der Modellierung von zusätzlichen Bahndriftparametern im Raum Hamburg auf gleichmäßig im Vernetzungsgebiet verteilten statischen Punkten ergab einen entfernungsabhängigen Anteil von etwa 0.6 ppm, der durch den simulierten Vernetzungsansatz gänzlich reduziert wurde.

Die Daten der Referenzstationen werden zur Modellierung der Fehlereinflüsse herangezogen. Die Verarbeitung aller Referenzstationsdaten auf der Nutzerstation erlaubt dem Nutzer, flexibel auf spezielle Gegebenheiten der Messung reagieren zu können. Jedoch sind sowohl die Anforderungen bezüglich der Ausrüstung als auch bezüglich des Rechenaufwandes auf der Nutzerstation hoch und damit als unwirtschaftlich zu betrachten (siehe Kapitel 4.3).

Sinnvoller sind Konzepte zur Vernetzung von GPS-Referenzstationen auf der Seite des Referenzstationsbetriebs. In jüngster Zeit sind hier die zwei Vorgehensweisen zur Berechnung von Virtuellen Referenzstationen (VRS) und von Flächenkorrekturparametern (FKP) entwickelt worden, die ebenfalls im Kapitel 4.3 vorgestellt werden. Konzeptionell ist die Nutzung der FKP für kinematische Anwendungen dem der VRS überlegen, da zum einen eine bidirektionale Datenverbindung in Echtzeit notwendig ist und zum anderen die Berechnungen der VRS permanent mit neuen Koordinaten nachgeführt werden müssen. Daher wurde nur die Vernetzung mit FKP untersucht. Generell können die entfernungsabhängigen Fehleranteile durch geometrische und durch ionosphärische Parameter beschrieben werden. Die geometrischen Korrekturen werden über die ionosphärenfreie Linearkombination L_0 , die ionosphärischen Korrekturen über das ionosphärische Signal in Form der Linearkombination L_I parametrisiert.

Grundlage der Untersuchungen bildeten zwei Datensätze aus dem Referenzstationsnetz der *Landesvermessung+Geobasisinformationen Niedersachsen* (LGN) zu unterschiedlichen Zeiträumen.

Der Datensatz aus dem Jahr 1998 wurde unter SA-Einfluss gemessen und weist hauptsächlich geometrische Korrekturen auf (Abbildung 5.7). Bei einer kinematischen Messung wurden über Entfernungen von 33 km zur Referenzstation in Echtzeit Genauigkeiten von etwa 2 cm mit und 8 cm ohne Nutzung der FKP ermittelt. Die Zeitdauer, um die Mehrdeutigkeiten zu lösen, lag mit FKP bei 30 s und ohne FKP bei 85 s.

Im Jahr 2002 war SA deaktiviert, jedoch sind verstärkt ionosphärische Aktivitäten in diesem Jahr aufgetreten. Es wurde mit den Daten des inzwischen voll ausgebauten Referenzstationsnetzes der LGN ein Netz simuliert, das in etwa den Ausdehnungen eines Netzes an der Deutschen Bucht entspricht. Die Untersuchungen der Positionslösungen zeigen für die Lösungen ohne FKP entfernungsabhängige Fehleranteile von etwa 1.5 ppm bis 3 ppm, die bei Verwendung der FKP auf unter 1 ppm und damit die Positionsgenauigkeiten auf besser als 3 cm innerhalb des Referenzstationsnetzes reduziert wurden. Auch außerhalb der Netzmasche kann der Einfluss generell gesenkt werden. Die Untersuchungen wurden in Zeiten mit moderaten ionosphärischen Aktivitäten durchgeführt. Die Auswirkungen starker Gradienten und Szintillationen der Ionosphäre auf die Vernetzung und deren Behebung sollten Gegenstand von zeitnah durchzuführenden Untersuchungen sein.

In Kapitel 5.4 wird ein Vorschlag für die Realisierung eines Referenzstationsnetzes an der deutschen Nord- und Ostseeküste auf der Basis bestehender SAPOS-Stationen erarbeitet. In der Nordsee kann der gesamte Bereich zwischen der Küste und der Insel Helgoland mit einem Referenzstationsnetz abgedeckt werden. Hierzu sind lediglich zwei zusätzliche Stationen in Schleswig-Holstein erforderlich. Für den Ostseebereich bietet es sich an, für eine sichere Vernetzung auch Referenzstationen in Dänemark zu betreiben. Alle Messgebiete, in denen verstärkt der Bedarf nach hochpräzisen Positionen für die Sicherheit der Schifffahrt, zur Erforschung von Küstenbewegungen und zur Unterstützung baulicher Vorhaben (z.B. Off-shore-Windparks) zu erwarten ist, sind damit abgedeckt. Die Vernetzung erfordert die Zusammenarbeit verschiedener Institutionen. Das Referenzstationsnetz als solches kann zusätzlich als Grundlage für die Messung geodynamischer Effekte dienen.

Die vollständige Modellierung des GPS-Fehlerhaushalts für hochpräzise Anwendungen mit Genauigkeiten von weniger als 3 cm erfordert die Berücksichtigung der stationsabhängigen Fehleranteile der PCV und des Multipath (siehe Kapitel 6). Von den verschiedenen Antennenkalibrierungsverfahren eignet sich das der Absoluten Feldkalibrierung am Besten für den Einsatz in Referenzstationsnetzen und auf bewegten Plattformen. Auf bewegten Plattformen müssen die PCV-Kalibrierungen zur vollständigen Reduzierung der Einflüsse mit Hilfe von Lagemesssystemen in das lokale ellipsoidische System transformiert werden. Die in den Untersuchungen von drei Antennen abgeleiteten Abweichungen verursachen jedoch nur ein um weniger als 1 cm erhöhtes Messrauschen bei Nutzung der PCV ohne Berücksichtigung der Lagewinkel in üblichen hydrographischen Anwendungen mit Neigungswinkel $<10^\circ$. Sind keine Lagemesssysteme an Bord oder sind die Genauigkeitsanforderungen mit größer als 3 cm anzunehmen, ist eine Anbringung einer Antennenkalibrierung auf einem Messschiff nicht erforderlich.

Für die Kalibrierung des Multipath auf Referenzstationen wurde ein neuartiges Verfahren entwickelt, das über die Dekorrelation des Multipath mit Hilfe eines Roboterarmes in direkter Nähe zu der zu kalibrierenden Station eine absolute Modellierung des Fehlereinflusses erlaubt. Die Ergebnisse in Tabelle 6.9 und Abbildung 6.16 zeigen eine Verbesserung von etwa 40% bis 60% auf einem Niveau von 1 mm für die Lagekomponenten und 2 mm für die Höhenkomponente mit der L_1 -Positionsbestimmung durch die Kalibrierung der Referenzstation. Für die Positionsbestimmung mit dem ionosphärenfreien, aber stärker rauschenden L_0 -Messsignal werden etwa 40% bis 50% Rauschreduzierung auf ein Niveau von etwa 3 mm für die Lagekomponenten und 7 mm in der Höhe erreicht.

Bei Verwendung der Vernetzung, der absoluten Antennenkalibrierungen und der Stationskalibrierungen ist eine Positionsgenauigkeit von besser als 3 cm auch über große Entfernungen von mehreren Zehnerkilometern für den gesamten deutschen Küstenbereich möglich. Für die Nutzung auf einem Messschiff muss die Position der GPS-Antenne üblicherweise auf einen hydrographischen Sensor zentriert werden. Dies erfordert den Einsatz von Lagemesssystemen mit einer Genauigkeitsanforderung von etwa 0.1° . Im Rahmen der Arbeit wurden auf GPS basierende Mehrantennensysteme und inertielle Messsysteme auf ihre Eignung hin untersucht. Es zeigte sich, dass eine sichere Lagewinkelbestimmung mit der geforderten Genauigkeit mit einem GPS Mehrantennensystem mit Basislängen von etwa 5 m durchführbar ist. Inertielle Messsysteme sind zumeist in der Bestimmung von Rollen und Stampfen genauer, weisen jedoch größere Kursabweichungen auf. Die Stützung mit GPS-Informationen verbessert die langperiodische Drift- und Biasbestimmung der INS deutlich.

Untersuchungen zur Überbrückung von GPS-Datenlücken mit inertialen Messeinheiten ergaben, dass mit dem verwendeten System Litef LCR-88 über 1 s bis 2 s die Genauigkeit gehalten werden kann. Für Navigationsanwendungen stellt das System eine Echtzeitposition mit einem Datenalter kleiner als 1 s mit besser als 0.2 m bereit. Mit besseren, aber wesentlich teureren Systemen können gemäß den Abschätzungen in Abschnitt 7.5 etwa 20 s mit einer Genauigkeit von etwa 2 cm überbrückt werden. Derartige Systeme eignen sich für eine vollständige Integration mit GPS-Informationen. Ein solches System kann eine direkte Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten bei Verlust der Phasenbeziehungen (*cycle-slip*) unterstützen.

Mit dem in Abschnitt 7.6 vorgestellten Konzept können die Daten verschiedener Sensoren mit definierten Schnittstellenformaten (NMEA, RTCM) in einem gemeinsamen Messsystem mit einer gemeinsamen Zeitbasis kombiniert werden. Verschiedene Sensoren sind einbindbar, sowohl INS als auch Magnetkompass. Als Ergebnis steht dem Nutzer eine hochpräzise Position auf einen beliebig wählbaren Sensor an Bord eines Messschiffes zur Verfügung, die einem hydrographischen Auswertesystem zugeführt werden kann. Inertielle Sensoren können über standardisierte Schnittstellen für die Positions- und Lagebestimmung gestützt werden.

Die Planungen der Systembetreiber erlauben eine positive Wertung der zukünftigen Nutzung von GNSS-Systemen. Bestehende Systeme werden modernisiert und zusätzliche Systeme sollen kompatibel zum GPS neu aufgebaut werden. Der Aufbau des europäischen Galileo-Systems wird kaum zur Genauigkeitssteigerung der GNSS beitragen, wohl aber die Verfügbarkeit der satellitengestützten Positionsbestimmung deutlich verbessern.

Es darf erwartet werden, dass der ionosphärische Anteil der entfernungsabhängigen Fehleranteile aufgrund des Sonnenzyklus in den nächsten Jahren bis etwa Mitte des Jahrzehnts deutlich geringer ausfallen wird. Die geometrischen Anteile der Bahnfehler sind durch die Deaktivierung des SA reduziert. Zukünftig muss untersucht werden, inwiefern auch die Beobachtungen instabiler Referenzstationen (z.B. Bohrplattform) zur Modellierung des Fehlerhaushalts herangezogen werden können. Bei Verwendung von Zweifrequenzempfängern können abgeleitete Informationen über die Ionosphäre die Modellierung stützen. Dies würde den Einsatzbereich in marinen Anwendungen deutlich erhöhen.

Gleichzeitig ist abzusehen, dass in Zukunft zumindest ein Teil der Antennen in Referenzstationsnetzen absolut kalibriert sein wird. Unterstützt durch die abnehmenden ionosphärischen Fehleranteile bis etwa 2008 wird es in den kommenden Jahren einfacher sein, genauere Analysen über die stationsabhängigen Fehleranteile in einem dichten Referenzstationsnetz durchzuführen, um Aussagen über die Variationen des Multipath ableiten zu können. Es ist zu vermuten, dass in diesem Fall nicht auf allen Referenzstationen die aufwändige Stationskalibrierung durchgeführt werden muss. In diesem Bereich ist noch erhebliches Forschungspotential vorhanden.

Die Untersuchungen zur Integration von GPS und INS werden stark vorangetrieben. Eine vollständige Integration zur Bestimmung von GPS-Phasensprüngen bzw. zur Überbrückung von Datenlücken über mehrere Zehnersekunden ist sinnvoll, kann jedoch zum derzeitigen Stand der Entwicklungen nur mit präzisiertem und damit teurem INS-Instrumentarium vorgenommen werden. Auch hier ist noch ein großes Forschungspotential erkennbar.

Mit einem optimierten Gesamtsystem, basierend auf den hier vorgestellten Verfahren und Instrumentarien, können alle beschriebenen Positionsanforderungen in marinen Anwendungen innerhalb eines regionalen Referenzstationsnetzes erfüllt werden.

Literaturverzeichnis

AdV (2001): AdV-Beschluss S/3 des Plenums *Satellitenpositionierungsdienst SAPOS -Standards, Vernetzung, Einheitlichkeit-* vom 28.11.2001, Fulda.

AdV (2002): *Satellitenpositionierungsdienst SAPOS*: Datei der Referenzstationen im Internet unter <http://www.sapos.de>, Stand Januar 2002 (04.02.2002).

Andrée, P., R. Läger, M. Schmitz, G. Wübbena (2000): Bestimmung von Schiffsbewegungen und anderen hochfrequenten Bewegungen mittels GPS. In: Beiträge zum Symposium "Ortung und Navigation 2000" der Deutschen Gesellschaft für Ortung und Navigation e.V. (DGON), Freising-Weihenstephan, 17.-19.10.2000.

Bachmann, M. (2001): Untersuchungen stationsabhängiger Fehleranteile der GPS-Positionsbestimmung in kinematischen Anwendungen. Diplomarbeit am Institut für Erdmessung, Universität Hannover, Januar 2001 (unveröffentlicht).

Bäumker, M. (1991): GPS/Inertial-eine "harmonische Mixtur". In: Festschrift Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Torge zum 60. Geburtstag. Aus der Reihe: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 172, 1991.

Bäumker, M. (1995): Kinematische GPS-Anwendungen mit inertialen Sensoren. Vortrag im Rahmen der Fortbildungsveranstaltung der FH Bochum, Fachbereich Vermessungswesen, und des VDV Landesverbandes Nordrhein-Westfalen, FH Bochum, 6. Oktober 1995.

Bäumker, M. (2002): Persönliche Mitteilungen.

Becker, D. (1994): Mehrwegeeinfluß bei GPS. Zeitschrift für satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation (SPN), Nr. 4, Jahrgang 1994.

Blomenhofer, H. (1996): Untersuchungen zur hochpräzisen kinematischen DGPS-Echtzeitverfahren mit besonderer Berücksichtigung atmosphärischer Fehlereinflüsse. Aus der Reihe: Schriftenreihe des Studienganges Vermessungswesen an der Universität der Bundeswehr München, Heft 51, Neubiberg, 1996.

BMBF (1996): Präzise GPS-gestützte Höhenzuordnung für kontinuierliche Lotungsmessungen auf Gewässern. Abschlussbericht zum gleichnamigen BMBF-Vorhaben (FKZ MTK0551) am Institut für Erdmessung, Universität Hannover.

BMBF (1998): Optimierung der hydrographischen Positions- und Lagebestimmung. Abschlussbericht zum BMBF-Vorhaben (FKZ MTK 590A und MTK 590B), Institut für Erdmessung, Universität Hannover, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, August 1998.

Böder, V. (1994): Präzise Positionierung mit GPS für eine Beschickung von Lotungsmessungen. In: Beiträge zum 9. Hydrographentag, Deutsche Hydrographische Gesellschaft, Hamburg, 26.-27.09.1994.

Böder, V., G. Seeber (1997): Real-Time PDGPS Positioning, Attitude Determination and INS-Integration for Hydrographic Applications. In: Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation. KIS97. Banff, Canada, 03.-06.06.1997, S.187-194.

- Böder , V., G. Seeber (1999): Präzise Positionsbestimmung mit GNSS und INS in der Hydrographie. In: 47. DVW-Seminar "Gewässervermessung und Hydrographische Informationssysteme", Technische Universität Dresden, 28.-30.09.1999.
- Böder , V. (2000): Eine Einführung zu GPS-Referenzstationsdiensten. VDV-Schriftenreihe, Band 19. Verlag Chmielorz GmbH, Wiesbaden (2001).
- Böder, V., F. Menge, G. Seeber, G. Wübbena, M. Schmitz (2001): How to Deal With Station Dependent Errors-New developments of the Absolute Field calibration of PCV and Phase-Multipath With a Precise Robot. In: Proceedings of 14. International Technical Meeting of The Institute of Navigation, 11.-14.09.2001, Salt Lake City, USA, S.2166-2176.
- Boithas, L. (1987): Radio Wave Propagation. North Oxford Academic Publishers Ltd., London, 1987.
- Butsch, F. (1997): Elektromagnetische Störungen bei GPS. Allgemeine Vermessungsnachrichten, Vol. 104, Nr. 5, 1997.
- Breuer, B., J. Campbell, B. Görres, J. Hawig, R. Wohlleben (1995): Kalibrierung von GPS-Antennen für hochgenaue geodätische Anwendungen. Zeitschrift für satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation (SPN), Nr. 2, Jahrgang 1995.
- Cannon, M.E., G. Lachapelle, M. Szarmes, J.M. Hebert, J. Keith, S. Jokerst (1997): DGPS Kinematic Carrier Phase Signal Simulation Analysis for Precise Velocity and Position Determination. In: Navigation: Journal of the Institute of Navigation, Vol. 44, No. 2, Summer 1997, USA.
- Clinton (2000): Improving the Civilian Global Positioning System (GPS). Press Release of The White House, Office of the Press Secretary, 01.05.2000.
- Denker, H., W. Torge (1998): The European Gravimetric Quasigeoid EGG97 -An IAG Supported Continental Enterprise-. In: Geodesy on the Move. Symposium der International Association of Geodesy (IAG), Vol. 119, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1998, S. 249-254.
- Deutscher Funknavigationsplan. Bundesministerium für Verkehr, Bauen und Wohnungswesen. Berlin, 1999.
- Deutsches Institut für Normung e.V.: Beschreibung von Ort, Lage und Bewegungsrichtung von Gegenständen. DIN 33417, Berlin, August 1987.
- Department of Defense (DoD) (2001): Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard. Assistant Secretary of Defense, Pentagon, Washington, 04.10.2001.
- Eichhorn, T. (1998): Untersuchung des TSS POS/MV 320 Systems zur hydrographischen Positions- und Lagebestimmung. In: Beiträge zum 13. Hydrographentag, Deutsche Hydrographische Gesellschaft, Papeburg, 08.-10. Juni 1998.
- Europäische Kommission (1999): Galileo-Involving Europe in a New Generation of Satellite Navigation Services. Communication from the Commission. Europäische Kommission, 10. Februar 1999.
- Farkas-Jandl, T. (1986): Einführung in die Inertialvermessung. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1986.
- Federhen, H.M. (1993): Worldwide Radionavigation Systems. IDA paper P-2852, Institute for Defense Analyses, Alexandria, Virginia, September 1993.
- Fontana, R.D., W. Cheung, P.M. Nowak, T.A. Stansell (2001): The New L2 Civil Signal. In: Proceedings of 14. International Technical Meeting of The Institute of Navigation, 11.-14.09.2001, Salt Lake City, USA, S.617-631.
- Gendt, G. (1997): Analyse der IGS-Daten und Ergebnisse. In: Beiträge zum 41. DVW-Fortbildungsseminar "GPS-Anwendungen und Ergebnisse 96" vom 07.-08.11.1996 am GFZ Potsdam, Schriftenreihe des DVW 28/1997, Verlag Konrad Wittwer, 1997.

- Georgiadou, Y., A. Kleusberg (1988): On carrier signal multipath effects in relative GPS positioning. *Manuscripta geodaetica*, Vol. 13, Nr. 13, S. 172-179, Springer-Verlag 1988.
- Goffinet, P. (2000): Qualitätssteigerung der Seevermessung und Navigation durch neuartige Beschickungsverfahren. Dissertation, Universität Hannover. Aus der Reihe: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 235, 1994.
- Gurtner, W., G. Mader, D. MacArthur (1989): A Common Exchange Format for GPS Data. In: Proceedings of the 5th International Geodetic Symposium on Satellite Systems, Las Cruces, 1989.
- Hankemeier, P, I. Engel (1998): SAPOS-Konzeption und Stand. In: Vorträge des 1. SAPOS-Symposiums, Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), 11.-12.05.1998, Hamburg.
- Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, J. Collins (2001): *Global Positioning System. Theory and Practise*. 5. Auflage, Springer, Wien-New York, 2001.
- Hopfield, H.S. (1969): Two-Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data. *Journal of Geophysical Research*, 74 (18), S. 4487-4499.
- Heimberg, F. (1994): Untersuchungen zum operationellen Einsatz des Differential GPS. Dissertation, Institut für Erdmessung, Universität Hannover. Aus der Reihe: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 202, 1994.
- Herring, T.A. (1972): Modeling Atmospheric Delays in the Analysis of Space Geodetic Data. In: Munck; J.C. de, Spoelstra, T.A.T. (editors): *Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy*. Netherlands Geodetic Commission, Delft, Vol. 36, S. 157-164.
- Interagency GPS Executive Board (2000): Web-Site <http://www.igeb.gov>
- Koch, O., N. Meder, P. Scheuber, T. Smiatek (1995): *OS/2 Warp Version 3. Das Kompendium*. Markt&Technik Buch- und Software-Verlag GmbH, 1995.
- Kolb, W. (1997): Interferenzprobleme bei GPS-Signalen-Grundlagen, Erfahrungen und Tipps bei Störungen des GPS-Empfangs. In: Unterlagen zum 46. DVW-Seminar "GPS-Praxis und Trends 97" vom 29.09.-01.10.1997, Frankfurt am Main, 1997.
- Kreye, C., B. Eissfeller, T. Lück (2001): Improvements of GNSS Receiver Performance Using Tightly Coupled INS Measurements. In: Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation. KIS 2001. Banff, Canada, 05.-08.06.2001.
- Kügler, D. (1999): Integration of GPS and Loran-C/Chayka: A European Perspective. *NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation*, Vol. 46, Nr. 1, Spring 1999, S.1-11.
- Lanigan, C.A., K. Pflieger, P.K. Enge (1990): Real-Time Differential Global Positioning System (DGPS) Data Link Alternatives. In: Proceedings of the Satellite Division's International Technical Meeting, ION GPS'90, Washington D.C., S.599-606.
- Mader, G.L. (1999): GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. *GPS-Solutions*, Vol. 3, Nr. 1, S.50-58.
- Mader, G.L., F. Czopek (2001): Calibrating the L1 and L2 Phase Centers of a Block IIA Antenna. In: Proceedings of 14. International Technical Meeting of The Institute of Navigation, 11.-14.09.2001, Salt Lake City, USA, S.1979-1984.
- McDonald, K. (2001): The Future of GNSS: New Capabilities, Performance and Issues. In: Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation. KIS 2001. Banff, Canada, 05.-08.06.2001.
- Meinke, H., F. Gundlach (1992): *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.

Menge, F., G. Seeber, C. Völksen, G. Wübbena, M. Schmitz (1998): Results of Absolute Field Calibration of GPS-Antenna PCV. In: Proceedings of 11. International Technical Meeting of The Institute of Navigation, ION GPS 1998, 15.09.-18.09.1998, Nashville, USA.

Menge, F., G. Seeber (1999): Untersuchungen und Beiträge zur Problematik der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen. In: Dietrich, R. (Ed.): Deutsche Beiträge zu GPS-Kampagnen des Scientific Committee in Antarctic Research (SCAR) 1995-1998, DGK, Reihe B, Nr. 310.

Mills, G.B. (1998): International Hydrographic Survey Standards. In.: International Hydrographic Review. Vol. 75, No. 2, International Hydrographic Bureau, Monaco, Sept. 1998, S. 79-85.

Müller, A. (2001): Sachstand und Entwicklungstendenzen GPS und GLONASS. In: Beiträge zum Symposium "Positionierung und Navigation" POSNAV 2001 der Deutschen Gesellschaft für Ortung und Navigation e.V. (DGON), Dresden, 06.-08.03.2001.

Muellerschoen, R.J., Y.E. Bar-Sever, W.I. Bertiger, D.A. Stowers (2001): NASA's Global DGPS for High Precision Users. GPS-World, January 2001, Vol. 12, Nr. 1, S.14-20.

Niell, A.E. (1996): Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths. Journal of Geophysical Research, 101 (B2), S. 3227-3246.

Parkinson, B.W., P.K. Enge (1996): Differential GPS. In: Global Positioning System: Theory and Applications. Parkinson und Spilker Jr. (Hrg.), 1996, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, USA.

Pelzer, H. (1980): Besonderheiten der Auswertung kontinuierlicher Messungen und Probleme ihrer Interpretation. In: Kontinuierliche Messungen in der Ingenieurgeodäsie. Veröffentlichungen des Geodätischen Institut der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Nr. 28. Vorträge zum Seminar am 28.-29.02.1980.

Pelzer, H. (1985): Grundlagen der mathematischen Statistik und der Ausgleichsrechnung. In: (Hrsg: H. Pelzer) Geodätische Netze in der Landes- und Ingenieurvermessung II. Vorträge des Kontaktstudiums Februar 1985. Konrad Wittwer, Stuttgart, 1985.

Rafferty, G., R. Lewis, T. Occhi (2000): Modernization of the GPS Satellite Constellation. In: Proceedings of ION GPS 2000, 19-22. September 2000, Salt Lake City, USA.

Reigber, C. (1997): IERS und IGS - Stand und Perspektiven. In: Beiträge zum 41. DVW-Fortbildungsseminar "GPS-Anwendungen und Ergebnisse 96" vom 07.-08.11.1996 am GFZ Potsdam, Schriftenreihe des DVW 28/1997, Verlag Konrad Wittwer, 1997.

Rothacher, M. (1999): Die Aktivitäten des Rechenzentrums CODE im Rahmen des IGS. In: Beiträge zum 46. DVW-Fortbildungsseminar "GPS-Praxis und Trends 97" vom 29.09.-01.10.1997 am BKG Frankfurt, Schriftenreihe des DVW 35/1999, Verlag Konrad Wittwer, 1999.

Rothacher, M. (2000): Comparisons of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations. GPS-Solutions, Vol. 4, No. 4, 2000.

Saastamoinen, J. (1973): Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction. Bulletin Géodésique, 107, S. 13-34.

Schupler, B.R., T.A. Clark, R.L. Allshouse (1994): Signal Characteristics of GPS User Antennas. NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation, Vol. 41, Fall 97, No. 3, USA.

Schupler, B.R., T.A. Clark, R.L. Allshouse (1995): Characterization of GPS User Antennas: Reanalysis and New Results. In: Beutler et al. (Ed.): "GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne, and Spaceborn Applications", Scientific Assembly of the International Association of Geodesy IAG Symposia 1995, 03.-04.07.1995, Boulder, USA. Springer Verlag.

Seeber, G. (1993): Satellite Geodesy. Walter de Gruyter-Berlin-New York, 1993.

- Seeber, G., F. Menge, C. Völksen, G. Wübbena, M. Schmitz (1997): Precise GPS Positioning Improvements by Reducing Antenna and Site Dependent Effects. In: Brunner (Ed.): "Advances in Positioning and Reference Frames", Scientific Assembly of the International Association of Geodesy IAG Symposia 1997, 03.-09.09.1997, Rio de Janeiro, Brasil. Springer Verlag.
- Sinapi, L.; S. Basker, G. Solari, H. Secretan, J.-P. Barboux (2000): The First EGNOS trials at Sea: In Columbus' Wake. Galileo's World, Autumn 2000, S. 12-17.
- Torge, W. (2001): Geodesy. Walter de Gruyter-Berlin-New York, 2001.
- Tsahk (1996): Mitteilung des Russischen Verkehrsministers Tsakh an die *International Civil Aviation Organization* (ICAO) am 04.06.1996.
- UNAVCO (1995): Receiver and Antenna Test Report. University Navstar Consortium (UNAVCO) Academic Research Infrastructure (ARI), Boulder, USA.
- UNAVCO (1997): Receiver and Antenna Test Report. University Navstar Consortium (UNAVCO) Academic Research Infrastructure (ARI), Boulder, USA.
- Vieweg, S. (1996): Modellierung zeitvarianter Fehler von Inertialsensoren mit Hilfe hochgenauer Ortungsreferenz. Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik (ZLR)-Forschungsbericht 96-05, Institut für Flugführung, Technische Universität Braunschweig, August 1996.
- Wanninger, L. (1994): Der Einfluß der Ionosphäre auf die Positionierung mit GPS. Dissertation, Institut für Erdmessung, Universität Hannover. Aus der Reihe: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 201, 1994.
- Wanninger, L. (1997): Virtuelle Referenzstationen in regionalen GPS-Netzen. 46. DVW-Fortbildungsseminar: GPS Praxis und Trends '97. Frankfurt am Main, DVW-Schriftenreihe 35/1999, S.199-212.
- Wanninger, L., Frevert, V., Wildt, S. (2000): Der Einfluss der Signalausbreitung auf die präzise Positionierung mit GPS. Zeitschrift für Vermessungswesen, Vol. 125, Nr. 1/2000, Verlag Konrad Wittwer, S.8-16.
- Weber, G., M. Becker, P. Franke (1999): GPS-Permanentnetze in Deutschland und Europa. In: Beiträge zum 46. DVW-Fortbildungsseminar "GPS-Praxis und Trends 97" vom 29.09.-01.10.1997 am BKG Frankfurt, Schriftenreihe des DVW 35/1999, Verlag Konrad Wittwer, 1999.
- Weber, T., C. Schäfer (2001): Galileo - eine neue Ära der Satellitennavigation. In: Proceedings zum Symposium *Positionierung und Navigation* POSNAV 2001 der Deutschen Gesellschaft für Ortung und Navigation e.V. (DGON), Dresden, 06.-08.03.2001.
- Wübbena, G. (1991): Zur Modellierung von GNSS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung. Dissertation, Institut für Erdmessung, Universität Hannover. Aus der Reihe: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 168, 1991.
- Wübbena, G., A. Bagge (1995): GPS-bezogene Ortungssysteme. Vortrag zum 37. DVW-Seminar "Hydrographische Vermessungen -heute-" vom 28.03.-29.03.1995 an der Universität Hannover.
- Wübbena, G., A. Bagge, G. Seeber, V. Böder, P. Hankemeier (1996): Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS-Applications by Establishing Reference Station Networks. In: Proceedings of 9. International Technical Meeting of The Institute of Navigation, September 1996, Kansas City, USA, S.1845-1852.
- Wübbena, G., M. Schmitz, F. Menge, G. Seeber, C. Völksen (1997): A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations. NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation, Summer 97, Vol. 44, No. 2.
- Wübbena, G. (1998): GNSS-Smart. Echtzeit-GPS genauer als 1 cm. In: Vorträge des 1. SAPOS-Symposiums, Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), 11.-12.05.1998, Hamburg.

Wübbena, G., M. Schmitz, F. Menge, V. Böder, G. Seeber (2000): Automated Absolute Field Calibration of GPS-Antennas in Real-Time. In: Proceedings of 13. International Technical Meeting of The Institute of Navigation, ION GPS 2000, 19.09.-22.09.2000, Salt Lake City, USA, S.2512-2522 .

Wübbena, G. (2001): Zur Modellierung von GNSS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung. In: Festschrift Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber zum 60. Geburtstag. Aus der Reihe: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 239, 2001.

Wübbena, G., S. Willgalis (2001): State Space Approach for Precise Real Time Positioning in GPS Reference Networks. In: Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation. KIS 2001. Banff, Canada, 05.-08.06.2001.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation basiert auf Arbeiten am Institut für Erdmessung in der Arbeitsgruppe Satellitengeodäsie, geleitet von Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber und gefördert vom *Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft, Forschung und Technologie* (BMBF). Die Arbeiten wurden auf vielfältige Weise durch enge Kooperationen mit der Geo++[®] GmbH, mit der Landesvermessung+Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) und mit Behörden der Wasser- und Schifffahrtsverwaltungen unterstützt. Für die vielen Gespräche und Hilfen in den gemeinsamen Projekten bedanke ich mich herzlich.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber dafür, dass er mir die Möglichkeit gab, die Arbeiten am Institut durchzuführen, für die Übernahme des Hauptreferates und für die wissenschaftliche Betreuung der Dissertation. Für die Übernahme des Korreferates bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. h.c. mult. Hans Pelzer.

Die Durchführung der Vorhaben waren von einer angenehm freund(schaft)lichen Arbeitsatmosphäre mit allen Mitarbeitern am Institut geprägt. Ohne den ergiebigen Gedankenaustausch und die vielen Sonderanfertigungen wären viele Entwicklungen und Untersuchungen nicht möglich gewesen. In den Dank schließe ich die studentischen Hilfskräfte und die von mir betreuten Diplomanden ein.

Für die vielen Diskussionen, Beiträge und Hinweise zur Arbeit bedanke ich mich -in alphabetischer Reihenfolge- bei Ralf Heyen, Dr.-Ing. Cord-Hinrich Jahn, Falko Menge, Dr.-Ing. Martin Schmitz, Dr.-Ing. Christof Völksen, Stefan Willgalis, Dr.-Ing. Gerhard Wübbena und bei meiner Frau Kerstin.

Besonders wichtig ist mir der Dank an meine Ehefrau Kerstin für die ständige Unterstützung und für das geduldige Ertragen aller Mühen und Belästigungen, die eine Promotion mit sich bringt. Ihr und unseren Kindern Hannes und Annika danke ich auch für die vielen spontanen Aufmunterungen und für die wirklich wichtigen Dinge im Leben.

Lebenslauf

Volker Böder

geboren am 20.06.1965 in Rotenburg/Wümme

verheiratet mit Kerstin Böder, geb.Voß, 2 Kinder

1971 - 1974	Besuch der Grundschule Waffensen
1974 - 1984	Besuch des Ratsgymnasiums Rotenburg
21. Juni 1984	Zeugnis der Allgemeinen Hochschulreife
Juli 1984 - Juli 1985	Grundwehrdienst
August 1985 - Januar 1988	Ausbildung zum Vermessungstechniker am Katasteramt in Verden
25. Januar 1988	Abschlussprüfung zum Vermessungstechniker
Februar 1988 - August 1988	Mitarbeiter bei der Firma Kreller, Dreieich-Sprendlingen
Oktober 1988 - Oktober 1994	Studium des Vermessungswesens an der Universität Hannover
Februar 1991 - Oktober 1994	Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Erdmessung an der Universität Hannover
Mai 1993 – Juli 1993	Tutor im Auftrage der Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ) an der Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Brasilien
13. Oktober 1994	Erlangung des Hochschulgrades Diplom-Ingenieur in der Fachrichtung Vermessungswesen
November 1994 – Februar 2002	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Erdmessung, Universität Hannover in der Arbeitsgruppe Satellitengeodäsie

Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover

(Eine vollständige Liste der Wiss. Arb. ist beim Geodätischen Institut, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover erhältlich.)

- Nr. 218 HEER, R., PELZER, H.: Proceedings of the 6th International FIG-Symposium on Deformation Measurements, 24-28 February, 1992
- Nr. 218 KUHLMANN, H.: Ein Beitrag zur Überwachung von Brückenbauwerken mit kontinuierlich registrierten Messungen (Diss. 1996)
- Nr. 219 KNIPP, K.: Untersuchungen zur Verwaltung und Verarbeitung von abbildenden Radardaten des Fernerkundungssatelliten ERS-1(Diss. 1996)
- Nr. 220 LEE, J. O.: Untersuchung von Verfahren zur kombinierten Aerotriangulation mittels integrierten GPS/INS (Diss. 1996)
- Nr. 221 SIEBE, E.: Komponenten einer digitalen photogrammetrischen Stereo-Arbeitsstation und Auswertungen von Scanner-Daten (Diss. 1997)
- Nr. 222 SCHIEWE, J.: Geo-Modellierungen mit Daten des Weltraumsensors MOMS-02 (Diss. 1997)
- Nr. 223 WILLEKE, U.: Zur Anwendung von Expertensystemen in der Grundstückswertermittlung (Diss. 1997)
- Nr. 224 GÜLAL, E.: Geodätische Überwachung einer Talsperre; eine Anwendung der KALMAN-Filtertechnik (Diss. 1997)
- Nr. 225 SCHMITZ, M.: Untersuchungen zur strengen GPS Parametrisierung in der gemeinsamen Ausgleichung von kinematischem GPS und Aerotriangulation (Diss. 1998)
- Nr. 226 GENS, R.: Quality assessment of SAR interferometric data
- Nr. 227 FESTSCHRIFT Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Gottfried Konecny zur Emeritierung (1998)
- Nr. 228 FOPPE, K.: Abschlußbericht DFG-Projekt Pe 187/9 "Geotechnisches Informationssystem"
- Nr. 229 BEHREND, D.: Untersuchungen zur Schwerefeldbestimmung in den europäischen Randmeeren (Diss. 1999)
- Nr. 230 SANTITAMNONT, P. Interferometric SAR Processing for Topographic Mapping (Diss. 1998)
- Nr. 231 SCHWIEGER, V. Ein Elementarfehlermodell für GPS-Überwachungsmessungen - Konstruktion und Bedeutung interepochaler Korrelationen (Diss. 1998)
- Nr. 232 POLLAK, B. Ein rechnergestütztes Planungssystem für die digitale Nahbereichsphotogrammetrie (Diss. 1999)
- Nr. 233 GBEI, F. E.: Nutzung von Satellitendaten für Landesvermessungszwecke in Entwicklungsländern am Beispiel der Elfenbeinküste (Diss. 1999)
- Nr. 234 LABBABIDI, A. R.: Beitrag zur Eisenbahntrassierung mit nicht linear gekrümmten Bögen (Diss. 1999)
- Nr. 235 GOFFINET, P.: Qualitätssteigerung der Seevermessung und Navigation durch neuartige Beschickungsverfahren (Diss. 1999)
- Nr. 236 ZHANG, S.: Interpolation of Geoidal/Quasigeoidal Surfaces for Height Determination with GPS (Diss. 1999)
- Nr. 237 VÖLKSEN, C.: Die Nutzung von GPS für die Deformationsanalyse in regionalen Netzen am Beispiel Islands (Diss. 2000)
- Nr. 238 ZAHRAN, K.: Accuracy Assessment of Ocean Tide Loading Computations for Precise Geodetic Observations
- Nr. 239 Festschrift: Univ. Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber zum 60. Geburtstag
- Nr. 240 QU, WEIDONG: Zur Anwendung der Fuzzy-Clusteranalyse in der Grundstückswertermittlung. (Diss. 2000)
- Nr. 241 Festschrift: em. Univ. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Torge zum 70. Geburtstag
- Nr. 242 FOPPE, Karl: Kombination von inertialen und satellitengestützten Beobachtungsverfahren Zur ingenieurgeodätischen Überwachung von Brückenbauwerken (Diss.2001)
- Nr. 243 PAKZAD, Kian: Wissensbasierte Interpretation von Vegetationsflächen aus multitemporalen Fernerkundungsdaten (Diss. 2001)
- Nr. 244 LENK, Ulrich: -2.5D-GIS und Geobasisdaten – Integration von Höheninformation und Digitalen Stationsmodellen (Diss. 2002)
- Nr. 245 BÖDER, Volker: Zur hochpräzisen GPS-Positions- und Lagebestimmung unter besonderer Berücksichtigung mariner Anwendungen (Diss. 2002)

Die Arbeiten werden im Rahmen des wissenschaftlichen Schriftenaustausches verteilt und sind nicht im Buchhandel erhältlich. Der Erwerb ist zu einem Stückpreis von € 25,- bei den herausgebenden Instituten möglich.