

**Nr. 255**

**Beiträge zur präzisen Echtzeitpositionierung  
in GPS-Referenzstationsnetzen**

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie  
der Universität Hannover  
zur Erlangung des Grades

**DOKTOR - INGENIEUR**

genehmigte Dissertation  
von  
Dipl.-Ing. Stefan Willgalis

HANNOVER 2005

---

Referent: Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Hansjörg Kutterer

Tag der mündlichen Prüfung: 1. April 2005

## Zusammenfassung

Die Dissertation analysiert die Voraussetzungen und das Potential der Vernetzung von GPS-Referenzstationen für die präzise differentielle Positionsbestimmung in Echtzeit. Bei einer Referenzstationsvernetzung werden die Beobachtungen der Referenzstationen in einer Multistationslösung in Echtzeit ausgewertet. Durch Berechnung einer Interpolationsfläche mit Hilfe der Residuen der Referenzstationen können die entfernungsabhängigen Fehler, zu denen durch die Ionosphäre und Troposphäre bedingte Laufzeitverzögerungen sowie Satellitenbahnfehler zählen, für jeden Ort innerhalb der Netzmasche präzisiert werden. Verschiedene Vernetzungsansätze zur Schätzung und Repräsentation der entfernungsabhängigen Fehler werden vergleichend diskutiert.

Die Einrichtung und der Betrieb von Referenzstationsnetzen erfordern einen hohen technischen, logistischen und administrativen Aufwand, um insbesondere die Echtzeitforderung zu erfüllen. So muss die Übertragung der Trägerphasenkorrekturen zum Nutzer innerhalb von einer Sekunde erfolgen. Die zeitlich und räumlich kontinuierliche Verfügbarkeit der Korrekturen ist sicherzustellen. Durch ein permanentes Monitoring und Qualitätsmanagement ist die Integrität eines solchen komplexen Gesamtsystems zu gewährleisten. Zugleich sind die RTK-Netze multifunktional auszugestalten, so dass sie für unterschiedliche Anwender und für verschiedenste Anwendungen nutzbar sind. Der gegenwärtige Stand und die zukünftigen Entwicklungen der dafür notwendigen Korrekturdatenformate und der Kommunikationslösungen sowie ausgewählter Referenzdienste werden eingehend beschrieben.

Das Potential der Referenzstationsvernetzung wurde durch Messungen in Norddeutschland und in den beiden brasilianischen Bundesstaaten Paraná und Pernambuco untersucht. Die BMBF-geförderte Wissenschaftlich-Technische Zusammenarbeit hatten zum Ziel, die Methodik und Technologie der Referenzstationsvernetzung nach Brasilien zu transferieren, auf die vorhandene Infrastruktur zu adaptieren und in verschiedenen Anwendungen zu erproben. Dabei waren besonders die durch die Nähe zum geomagnetischen Äquator bedingten extremen ionosphärischen Fehlereinflüsse zu berücksichtigen.

Die Untersuchungsergebnisse sowohl in Norddeutschland als auch in Brasilien belegen, dass die entfernungsabhängigen Fehler durch eine Referenzstationsvernetzung bis auf einen verbleibenden Fehler von 0,1 ppm weitestgehend kompensiert werden. Die mit dem Maximum des Sonnenzyklus 23 verbundenen Störungen spiegeln sich ebenso wie die erhöhte ionosphärische Aktivität am geomagnetischen Äquator in einem höheren Anteil erfolgloser Mehrdeutigkeitslösungen wider. Die Dauer und die Erfolgsquote der Mehrdeutigkeitslösungen ist darüber hinaus auch von der Signalverarbeitung der GPS-Empfänger, von den Übertragungseigenschaften der Kommunikationslösungen und von der Leistungsfähigkeit der Rechnerhardware abhängig.

Die horizontale und vertikale Integration der zunehmenden Anzahl an parallel arbeitenden aktiven GPS-Referenznetzen ist vorteilhaft für die Optimierung der Referenzstationsvernetzung. Für große Flächenländer wie Brasilien wird ein Konzept entworfen, verschiedene kleinräumige Netze in das übergeordnete landesweite Referenznetz einzubinden. Grundlage dieser Netzintegration ist die Zustandsmodellierung der GPS-Fehler in einem dynamischen Kalman-Filter mit dem Ziel, die entfernungsabhängigen Fehler für den Standort eines Nutzers direkt aus den Zustandsmodell abzuleiten.

Die Integration von GPS mit GLONASS und dem künftigen GALILEO-System erhöht die Redundanz bei der Echtzeitpositionierung. Wie kombinierte GPS/GLONASS-Messungen zeigen, ermöglicht die hohe Anzahl der künftig gleichzeitig verfügbaren Satelliten die genaue, schnelle und zuverlässige Positionsbestimmung auch bei größeren Abschattungen. Auch für die GNSS-Integration stellt die Zustandsmodellierung eine optimale Grundlage dar, um die Signale auf den unterschiedlichen Frequenzen, die vielen verschiedenen Uhrfehler und Laufzeitverzögerungen in der Hardware und sonstigen Fehler modellieren zu können. Bis zum Maximum des nächsten Sonnenzyklus bleibt Zeit, die Auswertalgorithmen und Infrastruktur der Referenzdienste den erneuerten und neuen Satellitennavigationssystemen anzupassen.

*Schlagwörter: Präzise Differentielle Echtzeitpositionierung (PDGPS), GPS-Multistationslösung, GNSS-Referenzstationsvernetzung, RTK-Netz, Satellitenpositionierungsservice (SAPOS), RTCM-Korrekturdatenübertragung, Kommunikationslösungen*

## Abstract

The prerequisites and the potential of GPS reference station networks for precise differential positioning in real time are analysed in this dissertation. In reference station networks, also known as RTK networks, the reference station observations are processed in real time in one multi-station solution. By interpolating the residuals of all reference stations, the distance dependent errors – mainly consisting of ionospheric and tropospheric errors as well as orbital errors – can be predicted for any location within the network. Various proposed or existing approaches for the estimation and representation of distance dependent errors are compared.

The set up and operation of multi-station reference networks require considerable technical, logistic, and administrative efforts especially to meet the real time requirement. Carrier phase corrections must be transmitted to the users within a very few seconds. The continuous temporal and spatial availability of corrections has to be ensured. Only by permanent monitoring and quality management can the integrity of such a complex system be guaranteed. At the same time, RTK networks must be designed to be multi-functional in order to serve many different users for various applications. The current state and future development of data formats and communication solutions for these purposes are described in detail as well as selected positioning services.

The performance of multi-station real time positioning was investigated by measurements in Northern Germany and in two States of Brazil, Paraná and Pernambuco respectively. The aim of this scientific and technical co-operation supported by the BMBF was the transfer of methodology and technology of reference station networks to Brazil. The networks were adapted to the available infrastructure and tested in diverse applications. Due to the proximity of the geomagnetic equator, extreme ionospheric errors had to be considered.

The results in Northern Germany as well as in Brazil prove that network RTK can compensate distance dependent errors to a great extent with only a minor error of 0.1 ppm remaining. Disturbances caused by ionospheric activities induced by either the maximum of solar cycle 23 or the proximity to the geomagnetic equator are reflected in an increase of unsuccessful ambiguity solutions. In addition, the investigations also proved the dependence of the time to fix ambiguities and of the success rate on the GPS receiver type, the transmission characteristics of the communication devices, and on the performance of the processing hardware.

In view of the increasing number of active reference networks, horizontal and vertical integration of networks is advantageous for the optimisation of real time positioning services. For large countries like Brazil a concept was proposed to integrate local RTK networks into the higher order national reference network. The concept is based on state space modelling of GPS errors in a dynamic Kalman filter. The aim is to derive network corrections for the user position directly from the state vector.

The integration of GPS with GLONASS and the future GALILEO system will increase the redundancy in real time network solutions. As combined GPS/GLONASS measurements show, the high number of simultaneously available satellites enables precise, fast, and reliable positioning even when large parts of the sky are masked. State space modelling is again the optimal basis for GNSS integration. It allows the modelling of the different clock errors, hardware delays, and other errors. Until the maximum of the upcoming solar cycle 24 occurs, sufficient time remains to adapt the algorithms and infrastructure of the positioning services to the modernized and new satellite navigation systems.

*Key Words: Precise Differential Real-Time Positioning (PDGPS), GPS Multi Station Solution, GNSS Reference Station Network, RTK Network, Satellite Positioning Service (SAPOS), RTCM Correction Transmission, Communication Solutions*

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	3
<b>Abkürzungen</b>	7
<b>1 Einleitung</b>	11
<b>2 Beobachtungs- und Ausgleichungsmodell</b>	15
2.1 GPS-Beobachtungsgrößen . . . . .	15
2.2 Systematische Fehlereinflüsse . . . . .	18
2.3 Linearisierung der Beobachtungsgleichungen . . . . .	19
2.4 Auswertung der Beobachtungsgleichungen . . . . .	21
2.5 Ausgleichungs- und Filterverfahren . . . . .	25
<b>3 Präzise Differentielle GPS-Echtzeitpositionierung</b>	31
3.1 Einführung . . . . .	31
3.2 Definitionen und Positionierungskonzepte . . . . .	31
3.3 Code-Korrekturen . . . . .	34
3.4 Trägerphasenkorrekturen . . . . .	39
3.5 Korrekturdatenformate . . . . .	42
<b>4 PDGPS-Echtzeitpositionierung in Referenzstationsnetzen</b>	55
4.1 Einleitung . . . . .	55
4.2 Konzepte zur Vernetzung von Referenzstationen . . . . .	56
4.3 Vernetzungs- und Repräsentationsmodelle . . . . .	58
4.4 Präzise Einzelpunktbestimmung . . . . .	75
4.5 Vergleichende Analyse . . . . .	78
<b>5 Referenznetzsegment</b>	81
5.1 Einleitung . . . . .	81
5.2 Kommunikationslösungen zur Korrekturdatenübertragung . . . . .	81
5.3 Aufbau von Referenzstationen . . . . .	94
5.4 Aufbau einer Nutzerstation . . . . .	96
5.5 Anforderungen an Positionierungsdienste . . . . .	98
5.6 Beispiele operationeller Positionierungsdienste . . . . .	99

<b>6 Untersuchungen in PDGPS-Referenzstationsnetzen</b>	103
6.1 Einleitung . . . . .	103
6.2 Untersuchungsansatz . . . . .	104
6.3 Echtzeitsimulation . . . . .	106
6.4 Untersuchungen in Norddeutschland . . . . .	108
6.5 Untersuchungen in Brasilien . . . . .	116
6.6 Anwendungen für Referenzstationsdienste . . . . .	124
<b>7 Integration von GPS-Referenzstationsnetzen</b>	131
7.1 Ausgangssituation . . . . .	131
7.2 Zustandsraummodellierung . . . . .	132
7.3 Hierarchisches Referenznetzkonzept für Brasilien . . . . .	135
<b>8 Integration von GNSS in Referenzstationsnetze</b>	137
8.1 Einleitung . . . . .	137
8.2 GPS-Modernisierung . . . . .	137
8.3 GLONASS . . . . .	140
8.4 GALILEO . . . . .	147
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>	153
<b>Literaturverzeichnis</b>	157
<b>Danksagung</b>	167

## Abkürzungen

A-S	Anti-Spoofing	DOP	Dilution of Precision
AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland	DOY	Day of Year
AGNES	Automated GPS-Network Switzerland	DREF	Deutsches Referenznetz
ALF	Accurate Positioning by Low Frequency	DVB	Digital Video Broadcasting
ARP	Antennenreferenzpunkt	EC	European Commission
ASCII	American Standard Code for Information Exchange	ECEF	Earth-Centered Earth-Fixed
B.E.	Broadcast Ephemerides	EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
BINEX	Binary RINEX	EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie	EPN	EUREF Permanent Network
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben	ESA	European Space Agency
bps	bits per second	ESTEC	European Space Technology Centre
C/A-Code	Clear-/Acquisition-Code	ETRS	European Terrestrial Reference System
CDMA	Code Division Multiple Access	ETSI	European Telecommunication Specification Institute
CHAMP	Challenging Minisatellite Payload	EU	Europäische Union
CIS	Conventional Inertial (Reference) System	FAA	Federal Aviation Administration
CMR	Compact Measurement Record	FDMA	Frequency Division Multiple Access
CODE	Center for Orbit Determination in Europe	FEM	Finite-Elemente-Methode
CONUS	Continental U.S.	FFSK	Fast Frequency Shift Keying
CORS	Continuously Operating Reference Stations	FIG	Fédération Internationale des Géomètres
CRINEX	Compact RINEX	FKP	Flächenkorrekturparameter
CS	GALILEO Commercial Service	FOC	Full Operational Capability
CSIC	Coordinational Scientific Information Center of Russian Space Forces	FRP	U.S. Federal Radio Navigation Plan
DAB	Digital Audio Broadcast	GALILEO	Galileo Galilei (1564-1642)
DD	Doppeldifferenz	GATE	German GALILEO Test Environment
DeCart	Departamento de Engenharia Cartográfica	GCC	GALILEO Control Centers
DGON	Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation	GDGPS	Global Differential GPS Reference Station Network
DGPS	Differential Global Positioning System	GEO	Geostationary Earth Orbit Satellite
		GFZ	GeoForschungsZentrum Potsdam
		GGN	Global GPS Network (NASA)
		GHPS	Geodätisch Hochpräziser Positionierungsservice
		GIBS	GPS Informations- und Beobachtungssystem (BKG)
		GIM	Globales Ionosphärenmodell

GISS	GALILEO Interim Support Structure	IGLOS	International GLONASS Service
GJU	GALILEO Joint Undertaking	IGR	IGS Rapid Orbit
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (Global Navigation Satellite System)	IGS	International GNSS Service
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying	IGU	IGS Ultra Rapid Orbit
GNSS	Global Navigation Satellite System	IOC	Initial Operational Capability
GPPS	Geodätisch Präziser Positionierungsservice	IODC	Issue of Data, Clock
GPPS	Geodätischer Postprocessing Positionierungsservice	IODE	Issue of Data, Ephemeris
GPRS	General Packet Radio Service	IOV	In-Orbit-Validierung
GPS	Global Positioning System	IP	Internet Protocol
GREF	Deutsches GPS Referenznetz	ISO	International Standardization Organisation
GRS 80	Geodetic Reference System 1980	ITRF	International Terrestrial Reference Frame
GSM	Global System for Mobile Communications	ITU	International Telecommunication Union
GSS	GALILEO Sensor Stations	IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics
GST	GALILEO System Time	JPL	Jet Propulsion Laboratory
GSTB	GALILEO System Test Bed	KOM	Europäische Kommission
GTRF	GALILEO Terrestrial Reference Frame	LADGPS	Local Area DGPS
GUS	Gemeinschaft Unabhängiger Staaten	LBS	Location Based Services
HEPS	Hochpräziser Echtzeitpositionierungsservice	LEO	Low Earth Orbit
HOW	Hand Over Word	LGN	Landesbetrieb Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen
HP	GLONASS High Precision Code	LGV	Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung Hamburg
HPPS	Hochpräziser Permanenter Positionierungsservice	LS 100	Lagestatus 100 (Amtliches Lagebezugssystem Niedersachsen)
IAG	International Association of Geodesy	MSAS	MTSAT Satellite-based Augmentation System
IAU	International Astronomical Union	MTSAT	Multi-Function Transport Satellite
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	MW	Mittelwelle
ICAO	International Civil Aviation Organisation	NGA	U.S. National Geospatial-Intelligence Agency
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	NGS	U.S. National Geodetic Survey
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service	NIMA	U.S. National Imagery and Mapping Agency
IfE	Institut für Erdmessung	NMEA	National Marine Electronics Association
IGDG	Internet-based Global Differential GPS	NPO PM	Nauchno Proizvodstvennoe Objedinenie Prikladnoi Mekaniki (Scientific Producing Association of Applied Mechanics)
IGEX-98	Internationales GLONASS-Experiment		



NRCAN	National Ressources Canada	SBAS	Satellite Based Augmentation System
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocoll	SIRGAS	Sistema de Referencia por GPS en America del Sur
OS	GALILEO Open Service	SISNeT	Signal-in-Space through the Internet
OSI	Open Systems Interconnections	SISRE	Signal-in-Space-Range-Error
OSTP	U.S. Office of Science and Technology Policy	SOL	GALILEO Safety of Life Service
OTF	On-the-Fly / On-the-Way Ambiguity Resolution	SP	GLONASS Standard Precision Code
P-Code	Precise (Protected)-Code	SPP	Single Point Positioning
P.E.	Precise Ephemerides	SPS	Standard Positioning Service
PAMR	Public Access Mobile Radio	STF	Signal Task Force
PCV	Phase Centre Variation	TCAR	Three Carrier Ambiguity Resolution
PDGPS	Precise DGPS	TCP	Transfer Control Protocol
PDOP	Position Dilution of Precision	TDMA	Time Division Multiple Access
PMR	Professional Mobil Radio	TEC	Total Electron Content
ppm	parts per million	TETRA	Terrestrial Trunked Radio
PPP	Precise Point Positioning	TID	Travelling Ionospheric Disturbances
PPS	Precise Positioning Service	TTFA	Time To Fix Ambiguity
PRC	Pseudo Range Correction	UDP	User Datagram Protocoll
PRN	Pseudo Random Noise	UDRE	User Differential Range Error
PRS	GALILEO Public Regulated Service	UERE	User Equivalent Range Error
PRS	Pseudoreferenzstation	UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
PZ-90	Parametry Zemli 1990	UFPR	Universidade Federal do Paraná
RASANT	Radio Aided Satellite Navigation Technique	UHF	Ultra High Frequency
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo	UKW	Ultrakurzwele
RDS	Radio-Daten-System	ULS	GALILEO Mission Uplink Stations
RINEX	Receiver Independent Exchange Format	UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
RoT	Rate of TEC	URA	User Range Accuracy
RRC	Range Rate Correction	USGS	U.S. Geological Survey
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics	USNO	U.S. Naval Observatory
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services	UTC	Universal Time Coordinated
RTG	Real Time GIPSY	VHF	Very High Frequency
RTK	Real Time Kinematic	VKS	Russische Weltraumstreitkräfte
SA	Selective Availability	VRS	Virtuelle Referenzstation
SAD 69	South American Datum 1969	W	Watt
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung	WAAS	Wide Area Augmentation System
SAR	GALILEO Support for Search and Rescue	WADGPS	Wide Area Differential GPS
		WGS 84	World Geodetic System 1984
		WRC	World Radio Conference
		WWDGPS	World Wide DGPS
		WWW	World Wide Web
		Y-Code	GPS encrypted Code



# 1 Einleitung

## Einführung

Die präzise geodätische Nutzung des Globalen Positionierungssystems (GPS) beruht auf Trägerphasenmessungen von mindestens zwei GPS-Empfängern über einen längeren Beobachtungszeitraum, an die sich eine Postprozessierung der zusammengeführten Messdaten anschließt. Simultane Beobachtungen zweier GPS-Empfänger sind notwendig, um die räumlich korrelierten Laufzeitfehler der GPS-Signale, die zu systematischen Verfälschungen der Positionslösungen führen, entweder zu eliminieren oder zu schätzen. Eine längere Beobachtungsdauer dient der Glättung des hochfrequenten Messrauschens und des Einflusses der Mehrwegeausbreitung.

Die Reduktion der systematischen Fehlereinflüsse ist Voraussetzung zur Mehrdeutigkeitslösung, d.h. der Festsetzung der Trägerphasenmehrdeutigkeiten auf ganzzahlige Werte. Erst die Lösung der Mehrdeutigkeiten ermöglicht die hochgenaue GPS-Positionierung. Zwar gibt es theoretische Untersuchungen, aus den Code- und Trägerphasenbeobachtungen nur einer Epoche Mehrdeutigkeiten zu schätzen, in der Praxis werden aber selbst mit den schnellen statistischen Suchalgorithmen viele Epochen für eine zuverlässige Mehrdeutigkeitslösung benötigt. Die Messdauer ist dabei eine Funktion des Abstandes der GPS-Empfänger. Reichen für kleinräumige Anwendungen von 10 bis 15 km Beobachtungszeiten von 15 bis 30 Minuten aus, sind über 100 km Abstand mehrstündige Beobachtungen für Positionierungsgenauigkeiten von einem Zentimeter und besser notwendig. Die Zuverlässigkeit dieser Positionsbestimmungen lässt sich nur durch Wiederholungsmessungen unter veränderten Umgebungsbedingungen gewährleisten, zu denen eine veränderte Satellitengeometrie und mit der Tageszeit veränderte atmosphärische Bedingungen gehören. Diese Anforderungen führen bei sehr langen Basislinien bei kontinentalen oder globalen Messungen zu mehrtägigen bis zu permanenten Beobachtungen.

In den 90er Jahren bildeten sich verschiedene parallele Entwicklungen mit unterschiedlichen Zielsetzungen heraus, die die Grundlage für die in dieser Arbeit behandelte Echtzeit-Referenzstationsvernetzung geschaffen haben. Für den wirtschaftlichen GPS-Einsatz sind die Beobachtungszeiten zu verkürzen bei gleichzeitiger Maximierung der Stationsabstände. Das Postprocessing ist durch Echtzeitlösungen zu ersetzen. Anstelle von temporär für eine Messung oder Messkampagne betriebenen Referenzempfängern sind permanent installierte, aktive GPS-Referenzstationen einzurichten, die verschiedenen Nutzern für unterschiedliche Anwendungen dienen.

Zur Verkürzung der Beobachtungszeiten konzentrieren sich die Forschungsarbeiten hauptsächlich auf die Entwicklung und Verbesserung von Verfahren zur Mehrdeutigkeitslösung über größere Entfernungen und auf kinematische Verfahren, wobei die Integration von GPS mit Inertialsystemen und anderen Sensoren eine große Bedeutung hat. Forschungsarbeiten zur Verfeinerung der Ionosphären- und Troposphärenmodelle sowie zur Abschirmung der Mehrwegeausbreitung und der Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses tragen durch Reduzierung des Fehlerbudgets ebenfalls zur Beschleunigung der Mehrdeutigkeitslösung bei.

Vorbild für den Übergang von Postprocessing-Auswertungen zu Echtzeitlösungen ist die Korrekturdatenübertragung nach dem Positionierungskonzept des differentiellen GPS (DGPS). Dabei werden auf Referenzstationen, deren Koordinaten bekannt sind, Verbesserungen zu den gemessenen Codebeobachtungen berechnet und zu einem Nutzer übertragen. Dieser verbessert mit den empfangenen Korrekturen seine eigenen Beobachtungen und damit auch die Genauigkeit seiner Positionsbestimmung. Diese Form der differentiellen Positionsbestimmung setzt voraus, dass die Fehlereinflüsse am Ort der Referenzstation und des Nutzers weitestgehend übereinstimmen. Die Anwendung des DGPS-Konzeptes auf Trägerphasenbeobachtungen führt zur präzisen differentiellen GPS (PDGPS)-Positionsbestimmung. Diese Vorgehensweise ist ungleich schwieriger, da eine größere Datenmenge in kürzerer Zeit zu übertragen ist

und die Mehrdeutigkeitslösung sehr schnell erfolgen muss. Mit den ab 1993 unter der Bezeichnung Real Time Kinematic (RTK) eingeführten Systemen ist das PDGPS-Konzept nur über kurze Basislinien von deutlich unter 10 km anwendbar, was allerdings mit den eingesetzten L1-Empfängern und der Reichweite der UHF-Funksysteme korrespondiert. Über lokale Detailvermessungen hinaus sind RTK-Systeme damit aber nicht wirtschaftlich einsetzbar.

DGPS- und RTK-Systeme basieren auf einer genau koordinierten Referenzstation. Ist eine solche Station permanent eingerichtet und sendet sie Korrekturdaten in einem herstellerunabhängigen Format aus, kann sie für alle Anwendungen in der Umgebung genutzt werden. Statt eine eigene Basisstation für jede Messung aufzubauen, nutzen die Anwender den Dienst, der die Referenzstationen betreibt und Korrekturdaten zur Verfügung stellt. Die aktiven Referenzstationen übernehmen dabei gleichzeitig die Funktion des durch Festpunkte vermarkten Bezugssystems. Daraus folgt für die Landesvermessung ein neues Konzept zur Realisierung des Raumbezugssystems, die in der Einrichtung und Erhaltung sehr teuren Festpunkte werden damit nicht mehr in der bisher vorhandenen Dichte benötigt. Ein anderer Aspekt ist der Einsatz der aktiven Referenzstationen für ingenieurgeodätische Überwachungsaufgaben und in geodynamischen Monitoringnetzen.

Die Zusammenführung der drei genannten Entwicklungslinien reicht jedoch noch nicht aus, einen für die Zwecke der Landes- und Katastervermessung geeigneten Referenzstationsdienst aufzubauen. Dazu sind weitere Entwicklungen im Bereich der Auswertelgorithmen notwendig, um die Informationen aller Referenzstationen eines Netzes zur Berechnung von Korrekturdaten nutzen zu können. Voraussetzung für solche Multistationslösungen sind allgemein akzeptierte Datenformate, geeignete Kommunikationsmittel und -verbindungen sowie Programmentwicklungen zur Steuerung, Verarbeitung und Auswertung der umfangreichen Datenströme.

In Deutschland wurde die Entwicklung des SAPOS-Referenzstationsdienstes seit Mitte der 90er Jahre auf Initiative der Landesvermessungsverwaltungen betrieben und in zwei Firmenlösungen realisiert. Das Institut für Erdmessung (IFE) der Universität Hannover war frühzeitig an den Untersuchungen in der Entwicklungs- und Aufbauphase beteiligt. In anderen Staaten hatte dagegen der flächendeckende Aufbau von Wide Area DGPS-Systemen Vorrang, die Entwicklung trägerphasenbasierter PDGPS-Dienste wurde erst später aufgenommen.

## **Zielsetzung**

Zu den Zielen der Arbeit gehört, das Potential der Echtzeit-Referenzstationsvernetzung abzuschätzen, ihre Eignung für Vermessungsanwendungen im Liegenschaftskataster und Landesvermessung zu verifizieren und ein Konzept für die wirtschaftliche Umsetzung in einem Flächenland wie Brasilien zu erarbeiten.

Unter Vernetzung wird dabei der netzartigen Zusammenschluss von einzelnen Referenzstationen mit GPS- oder kombinierten GPS/GLONASS-Empfängern verstanden, die allgemein als Global Navigation Satellite System (GNSS)-Referenzstationen bezeichnet werden. Deren Messdaten werden in einer Multistationslösung simultan ausgewertet, um für das überdeckte Gebiet verbesserte Korrekturdaten abzuleiten. Die unterschiedlichen Konzepte für Korrekturdaten werden miteinander verglichen. Es wird untersucht, inwieweit die Multistationslösungen geeignet sind, die räumlich korrelierten Fehleranteile zu modellieren.

Die Echtzeitfähigkeit wird in Anlehnung an die für Rechnersysteme geltende DIN 44300 wie folgt definiert: Betrieb eines Netzes von GNSS-Referenzstationen, deren Hardware permanent betriebsbereit ist und deren Software GNSS-Messdaten in der Weise kontinuierlich verarbeitet, dass die Ergebnisse der Multistationsauswertung innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne für jeden Nutzer innerhalb des Referenzstationsnetzes verfügbar sind. Die Zeitspanne umfasst damit die Sammlung, Verarbeitung und

Verteilung der Mess- und Korrekturdaten. Dazu werden die verschiedenen technischen Aspekte der Realisierung von Referenzstationsnetzen behandelt.

Die Untersuchungen erfolgten in Abstimmung mit der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) in der südniedersächsischen Referenzstationsmasche mit den zunächst nur vier Referenzstationen Hannover, Braunschweig, Clausthal-Zellerfeld und Alfeld. Zur Korrekturdatenübertragung diente ausschließlich der 2-m-Funk, wobei die Vernetzungsparameter nur von Hannover ausgestrahlt wurden.

Im Hamburger SAPOS-Referenznetz mit ebenfalls vier Stationen wurden Testmessungen in Zusammenarbeit mit dem Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV) Hamburg durchgeführt. Im Hinblick auf eine geplante, später aber nicht realisierte Einführung von GPS/GLONASS-Empfängern wurde das Potential kombinierter GPS/GLONASS-Beobachtungen für Multistationslösungen untersucht.

Weiterhin hat die Arbeit das Ziel, die Methodik und Technologie der Referenzstationsvernetzung nach Brasilien zu übertragen und an die dortigen, durch die Nähe zum geomagnetischen Äquator bedingten, extremen ionosphärischen Fehlereinflüsse zu adaptieren. Dazu wurden in Kooperation mit der Universidade Federal do Paraná (UFPR) in Curitiba und der Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) in Recife zwei Referenzstationsnetze mit je vier Stationen für drei beziehungsweise vier Wochen betrieben. Das Potential der Echtzeitpositionierung wurde in verschiedenen Anwendungen demonstriert, dazu zählen die Fahrzeugnavigation, topographische und hydrographische Vermessungen, Katastermessungen und Landesvermessung einschließlich präziser Höhenübertragungen.

Der flächendeckende Ausbau der Referenzstationsnetze in den Bundesländern und inzwischen auch weiteren Staaten wirft neue Fragestellungen bezüglich der möglichen zukünftigen algorithmischen und technologischen Entwicklungen auf. Für ein Flächenland wie Brasilien kommen dabei wirtschaftliche Aspekte hinzu, einen weitestgehend flächendeckenden Echtzeitpositionierungsdienst mit einer minimalen Anzahl an Referenzstationen zu realisieren. Dazu wird ein Konzept entwickelt, das die integrierte Nutzung unterschiedlicher Netzhierarchien und damit die Abdeckung dicht besiedelter und wirtschaftlich wichtiger Regionen im Rahmen eines sehr weitmaschigen landesweiten GPS-Netzes ermöglicht.

## **Gliederung**

Die vorliegende Arbeit ist in neun Kapitel gegliedert. Nach der Einleitung folgt ein Grundlagenkapitel über das den Untersuchungen zugrundeliegende Beobachtungs- und Ausgleichungsmodell. Die systematischen Fehleranteile der Beobachtungsgleichung werden im Hinblick auf die Referenzstationsvernetzung nach entfernungs- und stationsabhängigen Fehlern getrennt diskutiert. Die Grundlagen des Kalman-Filters und der stochastischen Prozesse werden erläutert, soweit sie für die Echtzeitvernetzung relevant sind.

Im dritten Kapitel sind die wesentlichen Definitionen und Konzepte der präzisen differentiellen Echtzeitpositionierung zusammengefasst, soweit sie sich auf eine einzelne Referenzstation beziehen. Die Berechnung verschiedener Formen von DGPS- und PDGPS-Korrekturen wird eingehend erläutert. Die herstellerunabhängige Korrekturdatenübertragung macht eine Standardisierung von Datenformaten notwendig, die mit dem allgemein akzeptierten RTCM-Standard verfügbar ist. Die wichtigsten Aspekte des RTCM SC-104 Standards werden analysiert.

Das vierte Kapitel geht von einer einzelnen Referenzstation über zur präzisen differentiellen Echtzeitpositionierung in einem Netz von Referenzstationen. Nach einer Erläuterung der Grundlagen einer Echtzeit-Multistationslösung werden verschiedene Vernetzungs- und Repräsentationsmodelle, die in den vergangenen Jahren entwickelt wurden, hinsichtlich ihrer Eignung für die zentimetergenaue Echtzeitpositionierung untersucht. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt auf dem in den Untersuchungen eingesetzten FKP-Modell.

Während die Kapitel zwei bis vier die theoretischen Grundlagen der Referenzstationsvernetzung umfassen, behandelt das fünfte Kapitel die technischen Fragestellungen, die sich im Zusammenhang mit dem Aufbau eines Referenzstationsdienstes ergeben. Für die Datenkommunikation, für die Hardwareausstattung der Referenz- und Nutzerstationen und für die Anforderungen an den Referenzdienst gibt es jeweils eine Vielzahl an Lösungen, die durch die fast unbegrenzten Kombinationsmöglichkeiten nahezu unüberschaubar werden. Die Darstellung beschränkt sich deshalb zum einen auf die Realisierungen im SAPOS-Dienst und in den beiden brasilianischen Referenzstationsnetzen, zum anderen werden Mindestanforderungen formuliert, die in einem Referenznetzsegment erfüllt sein müssen.

Das sechste Kapitel beinhaltet die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen im südniedersächsischen Referenzstationsnetz, in Hamburg und in den beiden brasilianischen Netzen. Die Untersuchungsmethodik wird beschrieben, eine Analyse der entfernungsabhängigen Fehler vorgenommen und Ergebnisse der verschiedenen Anwendungen präsentiert.

Im siebten Kapitel folgt ein Entwurf für die Integration der bislang unabhängig operierenden aktiven Referenzstationsnetze auf der Basis eines Zustandsraummodells. Während in Deutschland die SAPOS-Netze der Bundesländer blockweise verknüpft werden können, wird in Brasilien aus wirtschaftlichen Gründen eine vergleichbare Flächendeckung nicht erzielbar sein. Mit einem hierarchischen Stufenkonzept, bei dem kleine regionale Netze in das weitmaschige landesweite GPS-Netz eingebunden werden, wird es möglich sein, abgestufte Positionierungsgenauigkeiten vom Zentimeter- bis in den Dezimeterbereich in Echtzeit bereitzustellen.

Neben der Integration verschiedener GPS-Netze ist auch die Integration verschiedener GNSS-Systeme in der Vernetzung anzustreben. Im achten Kapitel werden die Vorteile kombinierter GPS/GLONASS-Messungen anhand eigener RTK-Messungen aufgezeigt. Der Stand und die für die kommenden Jahre angekündigte Entwicklung der drei GNSS-Systeme GPS, GLONASS und GALILEO wird ausführlich erläutert.

Die Arbeit schließt im neunten Kapitel mit der Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Fazit. Ein Ausblick auf zukünftig notwendige Weiterentwicklungen wird gegeben.

## 2 Beobachtungs- und Ausgleichungsmodell

Seit dem Beginn geodätischer GPS-Anwendungen basieren Auswertungen am Institut für Erdmessung zu einem großen Teil auf den Programmentwicklungen von Wübbena (1983, 1991). Der von ihm gewählte Weg der Auswertung undifferenzierter GPS-Beobachtungen wurde anfangs auch von anderen Forschungsgruppen verwendet, die später aber zu der einfacheren Parameterelimination übergegangen sind. Mit der Referenzstationsvernetzung erfährt die Parameterschätzung auf der Basis der undifferenzierten Beobachtungsgleichung eine Renaissance, da gerade die Bestimmung der Fehlereinflüsse zur Ableitung eines entfernungsabhängigen Fehlermodells notwendig ist.

In diesem Grundlagenkapitel wird das Beobachtungs- und Ausgleichungsmodell vorgestellt, das den Untersuchungen zugrundeliegt. Nach einer Übersicht der für die präzise Echtzeitpositionierung verfügbaren Beobachtungsgrößen folgt die Herleitung der nichtlinearen Beobachtungsgleichung für Trägerphasenmessungen. Die systematischen Fehlereinflüsse werden nach entfernungs- und stationsabhängigen Fehlern getrennt beschrieben, ohne den gesamten Fehlerhaushalt detailliert zu analysieren. Dies ist bereits in zahlreichen Arbeiten geschehen. Im Rahmen der Untersuchungsergebnisse wird speziell auf die entfernungsabhängigen Fehleranteile eingegangen. Im Zusammenhang mit der Linearisierung der Beobachtungsgleichung werden die Probleme des Rangdefektes und der Mehrdeutigkeitslösung diskutiert. Anschließend wird die Ausgleichung undifferenzierter und differenzierter Beobachtungen miteinander verglichen. Abschließend werden die zum Verständnis der Echtzeitvernetzung wichtigen Grundlagen des Kalman-Filters und der stochastischen Prozesse erläutert.

### 2.1 GPS-Beobachtungsgrößen

Die zur Positionierung mit GPS verwendeten Beobachtungsgrößen werden von Frequenznormalen in den GPS-Satelliten generiert. Aus der nominellen Grundfrequenz von  $f_0 = 10,23$  MHz werden durch ganzzahlige Frequenzvervielfachung die beiden Trägerphasen L1 und L2 sowie zwei Codes abgeleitet. Der C/A-Code und der P-Code werden in der Form von Pseudozufalls-codes (Pseudo Random Noise (PRN)) den Trägerphasen aufmoduliert (Abb. 2.1), wobei der C/A-Code nur auf L1, der P-Code dagegen auf beiden Trägerphasen übertragen wird. Die Abkürzung C/A (clear/acquisition) bezeichnet dabei den freien Zugriff auf das ungenauere Code-Signal, während das P sowohl für precision als auch protected steht, also den genaueren und geschützten Code beschreibt.

Der für alle Nutzer frei verfügbare C/A-Code unterliegt seit dem 2. Mai 2000 (White House 2000) nicht mehr der künstlichen Signalverschlechterung durch Selective Availability (SA). Der präzise P-Code ist nur autorisierten Nutzern zugänglich, da er durch Überlagerung mit dem unbekanntem W-Code zum Y-Code verschlüsselt wird, was als Anti-Spoofing (A-S) bezeichnet wird. Zusätzlich wird ein Datensignal, die Broadcast Message, mit für die Positionsberechnung wichtigen Informationen z.B. über Satellitenbahnen und -uhren abgestrahlt. Eine Modernisierung der zuvor beschriebenen klassischen GPS-Signalstruktur steht bevor und wird im Zusammenhang mit dem Einsatz der beiden Satellitennavigationssystemen GLONASS und GALILEO in Referenzstationsnetzen in Kap. 8 beschrieben.

Die Codes  $C(t)$  bzw.  $P(t)$  und das Datensignal  $D(t)$  werden den beiden Trägersignalen  $S_i(t)$  aufmoduliert. Das Signalgemisch wird als rechtshändig zirkular polarisiertes elektromagnetisches Signal von der Satellitenantenne abgestrahlt. Die drei Komponenten des Signalgemischs für den C/A- bzw. P-Code sind in (2.1) durch ihre Phase  $\omega_i$  und ihre Amplitude  $A_i$  beschrieben, zusätzlich sind noch die Abweichungen

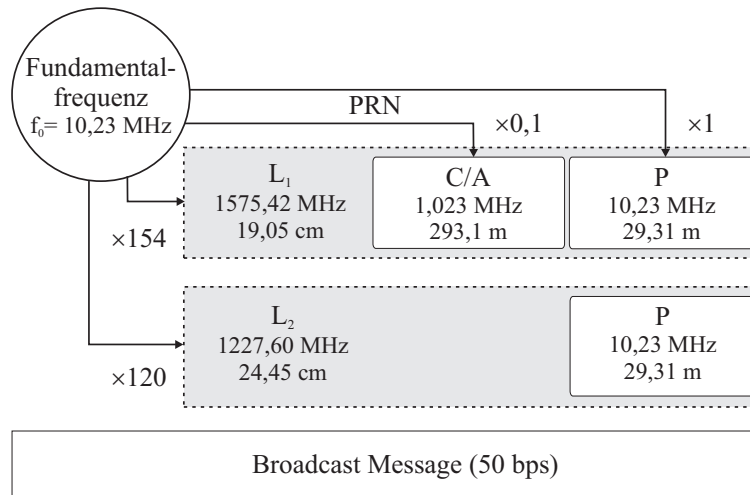


Abbildung 2.1: Struktur des klassischen GPS-Signals

der Satellitenuhr von der nominellen Frequenz und Laufzeitverzögerungen in der Satellitenhardware zu berücksichtigen (Wübbena 1991):

$$\begin{aligned}
 S_1(t) &= A_{P_1} D(t) P(t) \sin(\omega_1 t) \\
 S_{1_q}(t) &= A_{C_1} D(t) C(t) \cos(\omega_1 t) \\
 S_2(t) &= A_{P_2} D(t) P(t) \sin(\omega_2 t)
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Ein GPS-Empfänger muss die einzelnen Komponenten aus dem Signalgemisch rekonstruieren. Die Codemessung erfolgt durch Korrelation einer im Empfänger generierten Kopie des Codes mit dem empfangenen PRN-Code. Messgröße ist die Phase  $\Phi_C$  des im Empfänger generierten Codes bei maximaler Korrelation. Diese Phase entspricht der vom Satelliten abgestrahlten Phase zum Zeitpunkt der Signalausendung, wenn man Nachführungenauigkeiten der Code Tracking Loop und empfangernerinterne Laufzeitverzögerungen vernachlässigt. Bei der Trägerphasenmessung wird ein Differenzsignal, die Carrier Beat Phase, zwischen einem empfangernerinternen Referenzsignal und der empfangenen Trägerwelle gemessen. Wie von Wübbena (1991) gezeigt, repräsentiert das empfangene Trägersignal die abgestrahlte Phase zum Zeitpunkt der Signalausendung.

Die fundamentale Beziehung zwischen der Messung einer Code- oder Trägerphase im Empfänger und der Beobachtung der Phasenlage an der Satellitenantenne zum Sendezeitpunkt erlaubt den Übergang von einer Phasen- bzw. Frequenzmessung zu einer Messung der Signallaufzeit. Mittels der einfachen Beziehung

$$R = c_0 t_s \tag{2.2}$$

können über die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c_0 = 299.792.458 \text{ m/s}$  Signallaufzeiten  $t_s$  in Entfernungen  $R$  umgerechnet werden. Für geodätische Auswertungen ist die Darstellung der Messgrößen als Entfernungen am einfachsten. Zunächst soll jedoch noch einmal die Signallaufzeit betrachtet werden, um die besondere Rolle der Satelliten- und Empfängeruhren sowie systematischer Fehlereinflüsse beschreiben zu können.

Die wahre Signallaufzeit  $\tilde{\tau}_j^k$  berechnet sich aus der Differenz der Sende- und der Empfangsepoche eines Signals zwischen dem Satelliten  $i$  und dem Empfänger  $j$ :

$$\tilde{\tau}_j^i = \tilde{t}_j - \tilde{t}^i \tag{2.3}$$

Da der Aussendezeitpunkt  $t^i$  im Satellitenzeitrahmen und der Empfangszeitpunkt  $t_j$  im Empfängerzeitrahmen gemessen wird, die beide nicht miteinander synchronisiert sind, müssen die Abweichungen der



Satellitenzeitskala  $dt^i$  sowie der Empfängerzeitskala  $dt_j$  von der GPS-Systemzeit  $T_{GPS}$  berücksichtigt werden (Völkse 2000). Systematische Fehlereinflüsse, die die Signallaufzeit beeinflussen, werden im Term  $b_j^i$  zusammengefasst. Hinzu kommen zufällige Messabweichungen  $\varepsilon$ . Zur Berechnung der tatsächlichen Signallaufzeit

$$\tau_j^i = (t_j - dt_j) - (t^i - dt^i) + b_j^i + \varepsilon \quad (2.4)$$

reicht es aus, die Differenz  $dt^i - dt_j$  zwischen der Satelliten- und Empfängerzeitskala zu bestimmen:

$$\tau_j^i = (t_j - t^i) + (dt^i - dt_j) + b_j^i + \varepsilon \quad (2.5)$$

Werden die Differenz der Sende- und der Empfangsepoche mit  $\tau_0 = t^i - t_j$  und die Synchronisationsfehler der Satelliten- bzw. Empfängeruhr mit  $d\tau = dt_j - dt^i$  abgekürzt,

$$\tau_j^i = \tau_0 + d\tau + B_j^i + \varepsilon \quad (2.6)$$

und geht man mittels (2.2) von den Signallaufzeiten zu den Entfernungen über, gelangt man zur nichtlinearen Beobachtungsgleichung für Codemessungen:

$$PR_j^i = |\mathbf{R}_j^i| + \delta B_j^i + \varepsilon_j^i \quad (2.7)$$

Auf der rechten Seite der Beobachtungsgleichung (2.7) erfolgt eine Trennung in die geodätischen Parameter  $\mathbf{R}_j^i$ , die systematischen Fehler  $\delta B_j^i$  und das zufällige Messrauschen  $\varepsilon_j^i$ .

Die gemessene Entfernung zwischen den Antennenphasenzentren des Satelliten  $i$  und des Empfängers  $j$  weicht aufgrund systematischer Fehler  $B$ , insbesondere der Uhrsynchronisationsfehler, von der geometrischen Entfernung  $|\mathbf{R}_j^i|$

$$\mathbf{R}_j^i = \mathbf{X}^i - \mathbf{X}_j \quad (2.8)$$

ab und wird deshalb im allgemeinen als Pseudoentfernung  $PR$  bezeichnet.

Für Trägerphasenmessungen  $\Phi$  muss die Beobachtungsgleichung (2.7) um den Mehrdeutigkeitsterm  $\lambda N_j^i$  erweitert werden. Wegen frequenzabhängiger Fehlereinflüsse wird der Index  $s$  hinzugefügt, um das zu messende Signal zu bezeichnen. Auf die zusätzliche Angabe eines zeitvariablen Indizes für die Mess-epoche  $t(k)$  wird der Übersichtlichkeit wegen verzichtet. Damit lautet die nichtlineare Beobachtungsgleichung für Trägerphasen:

$$\Phi_{s,j}^i = |\mathbf{R}_j^i| + \delta B_{s,j}^i + \lambda_s N_{s,j}^i + \varepsilon_{s,j}^i \quad (2.9)$$

Die Messung der Carrier Beat Phase erfolgt zwar mit einer sehr hohen Auflösung von mindestens 0,1 rad (ICD-GPS-200C 2000) oder entsprechend 3 mm, worauf das hohe Genauigkeitspotential des GPS zurückzuführen ist. Zum Zeitpunkt der Signalakquirierung ist jedoch die Anzahl der ganzen Wellenzyklen und damit die absolute Entfernung zwischen Empfänger und Satellit unbekannt. Diese mit  $N$  bezeichnete Mehrdeutigkeit (Initial Ambiguity) bewirkt den entscheidenden Unterschied zu den Codebeobachtungen. Nur wenn der Mehrdeutigkeitsterm  $N$  zutreffend als ganzzahlige Größe geschätzt wurde, ist die hochgenaue Positionierung mittels Trägerphasen möglich.

Während die jeweilige Phasenlage hochgenau gemessen und jeder Nulldurchgang der sinusförmigen Trägerwelle registriert wird, bleibt der anfangs unbekannte Mehrdeutigkeitsterm  $N$  solange konstant, bis eine Signalunterbrechung auftritt. Sie bewirkt eine sprunghafte Änderung des Wertes für  $N$ , der neu geschätzt werden muss.

Wurde der Mehrdeutigkeitsterm  $N$  richtig bestimmt, kann er als Unbekannte aus der Beobachtungsgleichung eliminiert werden. Die für Trägerphasen formulierte Beobachtungsgleichung geht über in eine den Codemessungen ähnliche Pseudostreckengleichung. Pseudostrecken aus Codemessungen  $PR_C$  und aus Trägerphasenmessungen  $\Phi_{s,j}^i$  sind bei gelösten Mehrdeutigkeiten äquivalent:

$$PR_C = \Phi_{s,j}^i \quad (2.10)$$

## 2.2 Systematische Fehlereinflüsse

In der Beobachtungsgleichung für Codemessungen (2.7) und der korrespondierenden Beobachtungsgleichung für Trägerphasenmessungen (2.9) fasst der Fehlerterm  $\delta B_{s,j}^i$  alle uhrabhängigen Fehler  $\delta C_{s,j}^i$  zusammen sowie die systematischen Einflüsse, die für die weiteren Betrachtungen in entfernungsabhängige Fehler  $\delta D_{s,j}^i$  und stationabhängige Fehler  $\delta S_{s,j}^i$  eingeteilt werden. Alle Fehlerterme in den nachfolgenden Gleichungen sind als Entfernungsfehler ausgedrückt.

$$\delta B_{s,j}^i = \delta C_{s,j}^i + \delta D_{s,j}^i + \delta S_{s,j}^i \quad (2.11)$$

Der Sendezeitpunkt und der Empfangszeitpunkt der Signale sind verfälscht durch die Uhrfehler ( $\delta t^i, \delta t_j$ ) und Signallaufzeitverzögerungen ( $\delta d_s^i, \delta d_{s,j}$ ) in der Satelliten- bzw. Empfängerhardware:

$$\delta C_{s,j}^i = (\delta t^i + \delta d_s^i) - (\delta t_j + \delta d_{s,j}) \quad (2.12)$$

Streng genommen ist auch der Empfängeruhrfehler  $\delta t_j$  vom Beobachtungstyp abhängig. Da er jedoch für eine Empfänger-Satelliten-Kombination für alle Beobachtungstypen gleich ist, wird auf die signalabhängige Kennzeichnung verzichtet.

Signalverzögerungen, verursacht durch die Ionosphäre ( $\delta I_{s,j}^i$ ) und Troposphäre ( $\delta T_j^i$ ), bilden zusammen mit dem Vektor der Satellitenbahnfehler  $\delta \mathbf{o}^i$  den entfernungsabhängigen Fehlerterm  $\delta D$ . Zu beachten ist der unterschiedliche Einfluss der Ionosphäre auf Code- und Trägerphasen. Da sich Codesignale nur mit der Gruppengeschwindigkeit ausbreiten, werden sie gegenüber den Trägerwellen, die sich mit der Phasengeschwindigkeit fortpflanzen ( $-\delta I$ , phase advance), verzögert ( $+\delta I$ , code delay).

$$\delta D_{s,j}^i = \pm \delta I_{s,j}^i + \delta T_j^i + \frac{\mathbf{R}_j}{|\mathbf{R}_j|} \delta \mathbf{o}^i \quad (2.13)$$

Die Modellierung dieser räumlich und zeitlich korrelierten Fehler ist der Schlüssel zur präzisen Echtzeitpositionierung. Deren Schätzung in einem Referenzstationsnetz ermöglicht, wie in Kap. 4 beschrieben, die beschleunigte und zuverlässige Mehrdeutigkeitslösung als Voraussetzung für die zentimetergenaue Positionierung auch über größere Entfernungen.

Die Mehrwegeausbreitung ( $\delta M_{s,j}^i$ ) und die Variationen des Antennenphasenzentrums (PCV) der Empfangsantenne ( $\delta A_{f,j}^i$ ) zählen zu den stationsabhängigen Fehlern. Theoretisch müssen auch Phasenzentrumsvariationen ( $\delta E_{f,j}^i$ ) und Mehrwegeausbreitung an der Satellitenantenne ( $\delta W_s^i$ ) berücksichtigt werden. Hierbei handelt es sich um stations- bzw. satellitenindividuelle Fehler, d.h. sie sind unkorreliert zwischen den Referenzstationen.

$$\delta S_{s,j}^i = \delta A_{f,j}^i + \delta M_{s,j}^i + \delta E_{f,j}^i + \delta W_s^i \quad (2.14)$$

Die Leistungsfähigkeit der Referenzstationsvernetzung hängt entscheidend davon ab, wie gut die stationsabhängigen Fehler vorab kompensiert werden. Von diesen wurden bislang nur die antennenbezogenen Fehler eingehend untersucht (Menge 2003). Durch relative und absolute Kalibrierungsverfahren können die Fehler kompensiert werden, die durch unterschiedliche Phasenzentren verschiedener Antennentypen auftreten.

Von den Phasenzentrumsvariationen müssen die durch Mehrwegeeffekte bedingten Fehler getrennt werden. Deshalb wurde im Zusammenhang mit Antennenkalibrierungsverfahren frühzeitig mit der Entwicklung von Methoden zur Kalibrierung der stationsspezifischen Mehrwegeausbreitung begonnen (Böder 1999). Sie beruhen auf der festen Lage der Antenne gegenüber potentiellen Reflektoren und der täglich wiederkehrenden Satellitengeometrie. Ein zusätzlicher Ansatzpunkt besteht in der Elimination der zwischen den Referenzstationen unkorrelierten Einflüsse durch Mehrwegeausbreitung und Messrauschen durch Filterung der Referenzstationsbeobachtungen.

Die Auswirkungen der systematischen Fehler auf die absolute und differentielle GPS-Positionsbestimmung zeigt Tab. 2.1. Die angegebenen Werte geben Größenordnungen der Fehler wieder, die bei Messungen in Mitteleuropa beobachtet wurden.

Tabelle 2.1: Fehlereinflüsse bei der absoluten und differentiellen Positionierung mit GPS

GPS-Fehler - entfernungsabhängig	Fehlereinfluss	
	- absolut	- relativ
Satellitenuhr	5 ... 100 m	0 ppm
Satellitenorbit	5 ... 50 m	0,2 ... 2 ppm
Troposphäre	0,01 ... 0,5 m	0,1 ... 3 ppm
Ionosphäre	0,5 ... > 100 m	0,1 ... 50 ppm
<b>- stationsabhängig</b>		
Mehrwegeausbreitung Phase	mm ... cm	mm ... cm
Antennenphasenzentrum	mm ... cm	mm ... cm
Messrauschen	≤ 3 mm	≤ 4 mm

In der Beobachtungsgleichung (2.9) besteht eine lineare Abhängigkeit der Uhrparameter, Hardware-Laufzeitverzögerungen und Mehrdeutigkeiten. Aufgrund des Rangdefektes lässt sich das System der Beobachtungsgleichungen nicht ohne weiteres lösen. Die Bestimmung ganzzahliger Werte für die Mehrdeutigkeiten ist dadurch nicht trivial. In den meisten Auswerteverfahren werden die Bias-Parameter durch die Bildung geeigneter Differenzen der Beobachtungsgleichungen eliminiert. Alternativ besteht die Möglichkeit der Parameterschätzung. Dieses auf der Lösung undifferenzierter Beobachtungen beruhende Verfahren liegt der Software zugrunde, die bei den vorliegenden Untersuchungen eingesetzt wurde. Da dieser Ansatz grundsätzliche Vorteile für die Referenzstationsvernetzung bietet, wird in den folgenden Abschnitten das lineare Ausgleichsmodell und dessen Lösung erläutert.

## 2.3 Linearisierung der Beobachtungsgleichungen

Die nichtlineare Beobachtungsgleichung (2.9) wird üblicherweise mit einem linearen Schätzverfahren ausgewertet. Dazu erfolgt eine Taylor-Entwicklung um einen Näherungspunkt  $X_0$ :

$$\tilde{L} = \varphi(\tilde{X}) = \varphi(X_0) + \left( \frac{\partial \varphi(X)}{\partial X} \right)_0 (\tilde{X} - X_0) + \dots \quad (2.15)$$

Mit dem gekürzten Beobachtungsvektor

$$\mathbf{l} = \mathbf{L} - \mathbf{L}_0 \quad (2.16)$$

und dem gekürzten Parametervektor

$$\hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{X}} - \mathbf{X}_0 \quad (2.17)$$

folgt das bekannte linearisierte funktionale Modell der Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen mit der Designmatrix  $\mathbf{A}$  der partiellen Ableitungen  $\left( \frac{\partial \varphi(X)}{\partial X} \right)_0$ :

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} \quad (2.18)$$

Der Beobachtungsvektor  $\mathbf{L}$  wird nach den Messgrößen unterteilt, die jeder Empfänger von jedem beobachteten Satelliten registriert.

$$\mathbf{L}_i^j = (L_i^1(C1, P1, P2, C1, C2), \dots, L_i^n)^T \quad (2.19)$$

Der Parametervektor  $\mathbf{X}$  setzt sich zusammen aus dem Koordinatenvektor der Empfängerantenne, den Uhrfehlern und Laufzeitverzögerungen, dem Orbitfehler, den troposphärischen und den ionosphärischen Laufzeitverzögerungen sowie den Trägerphasenmehrdeutigkeiten.

$$\mathbf{X} = [X_i | X(C) | X(o) | X(T) | X(I) | X(N)]^T \quad (2.20)$$

Die Parameter werden nach globalen und lokalen Parametern unterschieden und in der Auswertung getrennt behandelt. Zu den globalen Parametern zählen alle, die über wenigstens einige Epochen konstant bleiben. Dazu gehören die Empfängerkoordinaten bei statischen Beobachtungen, die Mehrdeutigkeits-terme, die troposphärische Laufzeitverzögerung und die Bahnfehler. Lokale Parameter verändern sich dagegen von Epoche zu Epoche (Empfänger- und Satellitenuhrfehler, ionosphärische Laufzeitverzögerung).

Die Designmatrix enthält die partiellen Ableitungen der aus den Messgrößen abgeleiteten Pseudostrecken  $PR$  nach den unbekannt Parametern. Für den Satelliten- und Empfängeruhrfehler wird der Differentialkoeffizient zu einer Konstanten, wenn die Uhrfehler für jede Epoche neu geschätzt werden. Bei der Verwendung von Uhrmodellen wird der Differentialkoeffizient entsprechend aufwendiger gebildet (Wübbena 1991). Die Koeffizienten der weiteren Bias-Parameter sind nicht dargestellt.

$$\frac{\partial PR_{s,j}^i(t)}{\partial X_j(t)} = \left[ \frac{X^i(t) - X_j(t)}{|\mathbf{R}_j^i|} \frac{Y^i(t) - Y_j(t)}{|\mathbf{R}_j^i|} \frac{Z^i(t) - Z_j(t)}{|\mathbf{R}_j^i|} \right] \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial PR_{s,j}^i(t)}{\partial N_{s,j}^i(t)} = \lambda_s \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial PR_{s,j}^i(t)}{\partial dt} = c \quad (2.23)$$

Die Größe der Designmatrix beträgt je Epoche  $dim(m \times (u \times s))$  mit  $m$  aus verschiedenen Messgrößen abgeleiteten Pseudostrecken und  $u$  unbekannt Parametern für  $s$  Empfänger. Wegen der Bewegung der Satelliten ist die Designmatrix zeitvariabel.

Datums- und Konfigurationsdefekte in der Beobachtungsgleichung ziehen einen Rangdefekt in der Designmatrix nach sich. Dadurch ist die Normalgleichungsmatrix singulär und kann nicht invertiert werden. Die fehlende Möglichkeit eines Empfängers, sich direkt an die als fehlerfrei angenommene GPS-Systemzeit anzuschließen, verursacht den Datumsdefekt. Die Trägerphasenbeobachtungen beziehen sich nur auf die Differenz (carrier beat phase) zwischen der empfangenen Trägerphase und der im Empfänger generierten Phase, absolute Uhrfehler lassen sich damit nicht ohne weiteres schätzen. Eine Lösung besteht darin, den Fehler der Uhr eines Referenzsatelliten für alle Epochen einer Session festzuhalten (z.B. Null setzen oder einen a priori Wert wählen). Beim Eliminationsverfahren wird der Datumsdefekt dadurch beseitigt, dass alle Uhrfehler durch Differenzbildung explizit eliminiert werden.

Aus der linearen Abhängigkeit des Empfängeruhrfehlers  $\delta t_{rcv}$ , Satellitenuhrfehlers  $\delta t_{sv}$  und der Mehrdeutigkeitssterme  $N_i^k$  resultiert ein Konfigurationsdefekt. Die drei nicht ohne weiteres trennbaren Parameter führen zu einem Rangdefekt der Größe  $(r + s + n - 1)$  im Normalgleichungssystem, mit  $r$  Anzahl der Empfängeruhren,  $s$  Anzahl der Satellitenuhren und  $t$  Anzahl der Epochen (Grant et al. 1990). Um den Rangdefekt der Trägerphasen-Beobachtungsgleichung zu lösen, muss über eine genau dem Rangdefekt entsprechende Anzahl an Parametern verfügt werden. Solange die Mehrdeutigkeiten für alle Epochen unverändert bleiben, sind  $r + s - 1$  der  $rs$  Mehrdeutigkeiten festzusetzen. Getrennt davon ist der auf  $r + s$  Uhrfehler beruhende Rangdefekt  $n$  zu behandeln. Da bei  $n$  Epochen entsprechend über  $n$  Uhrfehler, d.h. über 1 Uhrfehler je Epoche, zu verfügen ist, wird ein Empfängeruhrfehler zu Null gesetzt oder alternativ kann ein Mittelwert aller SV-Uhrfehler gewählt werden.

Die Auswahl der Mehrdeutigkeiten, über die a priori verfügt werden soll, unterliegt folgenden Einschränkungen. Mit einer Ausnahme darf jeder Satellit und jeder Empfänger nur einmal einbezogen werden, d.h. die betreffenden Mehrdeutigkeitsterme dürfen entweder nur einen Satelliten oder nur einen Empfänger repräsentieren. Nur in dem einen Ausnahmefall werden ein Empfänger und ein Satellit durch einen Mehrdeutigkeitsterm miteinander verknüpft, weshalb für  $rs$  Mehrdeutigkeiten nur  $r + s - 1$  Mehrdeutigkeiten festgesetzt werden müssen (de Jonge 1998). Sinnvollerweise werden jene Mehrdeutigkeiten ausgewählt, die über die meisten Epochen konstant bleiben und damit am längsten beobachtet wurden. Neben den bekannten Vorgehensweisen, einen Basissatelliten und -empfänger festzulegen (Pivot-Strategie) oder durch zyklisches Tauschen eine Kette von Empfängern und Satelliten zu bilden, verweist (de Jonge 1998) auf die Vorteile der aus der Graphentheorie stammenden Technik des Minimum Spanning Trees.

Die Wahl der Uhrparameter bleibt praktisch ohne Einfluss auf die Positionslösung, solange Mehrdeutigkeiten nicht gelöst werden müssen. Größere Abweichungen von den wahren Werten beeinflussen lediglich die Schätzungen der anderen Uhrparameter. Sind dagegen Mehrdeutigkeiten festzusetzen, dürfen die vorab ausgewählten Uhrparameter nur wenig vom wahren Wert abweichen (Grant et al. 1990). Weiterhin gelingt die Schätzung der Mehrdeutigkeiten nur, wenn hinreichend genaue Näherungskordinaten aus z.B. einer Float-Lösung vorliegen. Zur Behandlung der Uhrparameter und Eliminierung von Rangdefekten lassen sich folgende Strategien unterscheiden:

- Festsetzung ausgewählter Uhrparameter
- Schätzung der aus Differenzbildungen resultierenden Linearkombination von Uhrparametern
- Einführung externer Zwänge durch die Kovarianzmatrix oder Verwendung zusätzlicher Beobachtungen wie z.B. Pseudostrecken
- Anwendung der Pseudoinverse.

Erst nach Beseitigung der Rangdefekte der Trägerphasenbeobachtungsgleichung können die Mehrdeutigkeitsterme  $N$  als ganzzahlige Werte geschätzt werden. Nur unter dieser Voraussetzung lässt sich das hohe Genauigkeitspotential der Trägerphasenbeobachtungen ausschöpfen. Seit der Anfangsphase der geodätischen GPS-Anwendung werden zwei unterschiedliche Ansätze zur Beseitigung der Rangdefekte verfolgt. Den Weg der Parameterschätzung wählten u.a. Goad (1985), Lindlohr, Wells (1985) und Wübbena (1983), die direkt die undifferenzierten Beobachtungen ausgewertet haben. Die Mehrzahl der GPS-Auswertesoftwarepakete basiert dagegen auf der Parameterelimination, bei der der Rangdefekt durch Differenzieren der Beobachtungen eliminiert wird. Beide Ansätze werden in Kap. 2.4 vergleichend vorgestellt.

## 2.4 Auswertung der Beobachtungsgleichungen

### 2.4.1 Behandlung der systematischen Fehler

Die Beobachtungsgleichungen setzen sich zusammen aus geodätischen Parametern, systematischen Fehlern und zufälligen Messfehlern. Zu den geodätischen Parametern  $\mathbf{x}_R$  zählen die Empfängerkoordinaten und Funktionen davon. Die Störparameter  $\mathbf{x}_B$  setzen sich aus den Uhrfehlern, Mehrdeutigkeiten und weiteren systematischen Fehlern zusammen. Mit dieser Trennung lautet die linearisierte Beobachtungsgleichung:

$$\hat{\mathbf{L}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_I & \mathbf{A}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_R \\ \hat{\mathbf{x}}_B \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

Die systematischen Fehlereinflüsse können auf unterschiedliche Weise in einer Auswertesoftware berücksichtigt werden, mit dem Ziel, den Rechenaufwand zu minimieren:

- Explizite Schätzung der Störparameter (Parameterschätzung)
- Elimination der linear korrelierten Fehler durch Differenzbildung (Parameterelimination)

- Direkte Messung der Fehler (z.B. Zweifrequenzmessungen zur Bestimmung der ionosphärischen Verzögerung)
- Modellierung der Fehler, ggf. mit Hilfe externer Informationen (z.B. troposphärische Laufzeitverzögerung).

Nur die beiden erstgenannten Methoden eignen sich zur Behandlung der Uhrfehler und Mehrdeutigkeiten. Nach dem fundamentalen Differenztheorem von Lindlohr, Wells (1985) ergeben beide Ansätze identische Ergebnisse. Dies gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, dass die durch die Differenzbildung eingeführten mathematischen Korrelationen vollständig in der Kovarianzmatrix berücksichtigt werden. Außerdem müssen äquivalente Uhrfehlermodelle verwendet werden. Dies trifft aber nur in dem einen Fall zu, wenn der Uhrfehler als unabhängiger Parameter zu jeder Epoche, d.h. als weißes Rauschen, geschätzt wird. Bei der Anwendung anderer Uhrmodelle gilt das fundamentale Differenztheorem nicht mehr.

### 2.4.2 Ausgleichung undifferenzierter Beobachtungen

In der geodätischen Ausgleichsrechnung ist die Lösung großer Gleichungssysteme mit vielen Parametern nicht ungewöhnlich, in denen auch singuläre Normalgleichungssysteme auftreten können. Ebenso ist auch die Ausgleichung originaler oder undifferenzierter GPS-Beobachtungen grundsätzlich möglich. Die Bezeichnung als undifferenzierte Beobachtungen oder auch als zero differences wird ungeachtet dessen genutzt, dass es sich bei der Messgröße um das Differenzsignal zwischen der Trägerphase des Satelliten und der Referenzphase im Empfänger handelt.

Wie zuvor beschrieben führen die linearen Abhängigkeiten in der Beobachtungsgleichung bei der Ausgleichung der Original- oder undifferenzierten Beobachtungen zur Singularität der Normalgleichungsmatrix. Der prinzipielle Lösungsansatz beruht auf der Verfügung über ausgewählte Parameter durch Einführung von Näherungswerten und a-priori-Gewichten.

So führt Wübbena (1991) den Satellitenuhrfehler mit einem Erwartungswert Null ein und schätzt die Genauigkeit der Satellitenuhrparameter mit Hilfe des mit der Broadcast Message übertragenen User Range Accuracy (URA)-Parameters ab. Der URA-Parameter beträgt 4–7 m und war bei aktiviertem SA auf 32 m gesetzt. Zur Wahl der a-priori-Varianzen der Laufzeitverzögerungen in der Satelliten-Hardware werden die Systemspezifikationen zugrundegelegt. Für die Trägerphasenmehrdeutigkeiten werden Näherungswerte aus Codebeobachtungen oder geeigneten Linearkombinationen der Beobachtungen abgeleitet, woraus auch Schätzwerte für die a-priori-Varianzen folgen. Um den Einfluss der Mehrwegeausbreitung und der Ionosphäre auf C/A-Code-Beobachtungen zu berücksichtigen, muss die Varianz entsprechend groß gewählt werden. Bereits die Näherungswerte müssen erwartungstreu geschätzt werden, damit auch die Ausgleichung mit den eingeführten Näherungswerten und a-priori-Varianzen zu einer erwartungstreuen Schätzung führt. Um dies zu gewährleisten, sollte die a-priori-Varianz groß genug gewählt werden.

Im Ergebnis werden absolute Koordinaten geschätzt, keine abgeleiteten Größen wie Basisvektoren oder Raumstrecken. Der Auswertansatz ermöglicht eine große Flexibilität bei der Planung und Durchführung von GPS-Beobachtungen, insbesondere wenn viele Empfänger beteiligt sind. Soweit verfeinerte Modelle für die einzelnen Störparameter zur Verfügung stehen, können sie in die Beobachtungsgleichung integriert werden.

In der Anfangsphase des GPS-Systems wurden eine Reihe von Softwarepaketen auf der Basis undifferenzierter Beobachtungen entwickelt (Goat 1985, Lindlohr, Wells 1985, Wübbena 1983, Landau 1990). Als vornehmlich wissenschaftliche Postprocessing-Software basieren GEONAP und GIPSY-OASIS II noch auf diesem Ansatz. Für Auswertungen im globalen Permanentstationsnetz nach dem Precise-Point-Positioning-Ansatz (Kap. 4.4) und für die Echtzeitpositionierung in Referenzstationsnetzen werden die undifferenzierten Beobachtungen wieder verstärkt genutzt.

### 2.4.3 Ausgleichung differenzierter Beobachtungen

Der Ansatz, die systematischen Fehler durch Differenzbildung der GPS-Beobachtungsgleichungen zu eliminieren, geht auf das VLBI-Verfahren (Counselman, Shapiro 1979) zurück, das auf Einfachdifferenzen zwischen Stationen beruht. Vergleichbar den VLBI-Messungen standen auch bei GPS-Messungen in der Anfangsphase des GPS kaum mehr als jeweils zwei Empfänger zur Verfügung. Deshalb fand die Basislinienauswertung bei GPS-Messungen breite Anwendung.

Das Grundprinzip der Parameterelimination beruht darauf, durch Linearkombinationen der Beobachtungsgleichungen Differenzen gleicher Beobachtungstypen zwischen Empfängern, Satelliten und Epochen zu bilden.

In der Einfachdifferenz  $\Delta$  zwischen Empfängern (Single Difference between Stations) wird die Differenz eines von zwei unterschiedlichen Empfängern zeitgleich beobachteten Signals gebildet (Abb. 2.2). Dabei werden die dem beobachteten Satelliten zugeordneten Fehler (Satellitenuhr, Hardwareverzögerungen, Bahnfehler) weitgehend eliminiert. Die Empfänger müssen zur gleichen Epoche messen, was bei modernen GPS-Empfängern angenommen werden darf. Die Elimination der ionosphärischen und troposphärischen Laufzeitverzögerungen hängt davon ab, wie stark die atmosphärischen Fehler zwischen den Empfängern korreliert sind. Mit zunehmendem Stationsabstand sinkt die Korrelation und die atmosphärischen Restfehler nehmen zu. In der symbolischen Schreibweise lautet die Gleichung der Einfachdifferenz (Wübbena 1991):

$$\Delta PR_{a,b}^i(t_k) = PR_b^i(t_k) - PR_a^i(t_k) \quad (2.25)$$

Entsprechend kann auch eine Einfachdifferenz  $\nabla$  zwischen Satelliten gebildet werden (Abb. 2.3), bei der die empfängerspezifischen Fehler eliminiert werden (Empfängeruhr, Hardwareverzögerungen, Antennenphasenzentrumsfehler):

$$\nabla PR_a^{i,j}(t_k) = PR_a^j(t_k) - PR_a^i(t_k) \quad (2.26)$$

Von besonderer Bedeutung ist die Doppeldifferenz  $\nabla\Delta$  (Double Difference). Hierbei wird die Differenz zwischen zwei zur gleichen Epoche gebildeten einfachen Differenzen zu zwei Satelliten berechnet (Abb. 2.4). In der Doppeldifferenz werden die satelliten- und empfängerspezifischen Uhrfehler und die Hardwareverzögerungen eliminiert und damit auch der uhrbezogene Rangdefekt beseitigt. Die atmosphärischen Fehler werden in Abhängigkeit des Stationsabstandes reduziert. Da die Mehrdeutigkeiten der Doppeldifferenz wieder ganzzahlig sind, ist die doppelte Differenz der Beobachtungsgleichung Grundlage der Algorithmen zur Mehrdeutigkeitslösung:

$$\nabla\Delta PR_{a,b}^{i,j}(t_k) = \Delta PR_{a,b}^j(t_k) - \Delta PR_{a,b}^i(t_k) \quad (2.27)$$

Außer zwischen Empfängern und Satelliten können auch Differenzen  $\delta$  zwischen den Signalen aufeinanderfolgender Epochen gebildet werden. Durch die relative Bewegung der Satelliten gegenüber den Empfängern lässt sich ein Dopplereffekt beobachten und die Phasenänderungen zwischen aufeinanderfolgenden Epochen als Dopplerbeobachtung nutzen. Die Differenz zweier zu unterschiedlichen Epochen gebildeter Doppeldifferenzen wird als Dreifachdifferenz  $\delta\nabla\Delta$  bezeichnet (Abb. 2.5). Diese Linearkombination ist nicht zur Mehrdeutigkeitslösung geeignet, da der Mehrdeutigkeitsterm eliminiert ist. Aufgrund des durch das mehrfache Differenzieren nach dem Kovarianzfortpflanzungsgesetz ansteigenden Messrauschens sind Dreifachdifferenzen auch nicht zur Koordinatenschätzung geeignet. Ihr Nutzen besteht unter der Voraussetzung guter Näherungskordinaten in der Möglichkeit, Phasensprünge (Cycle Slips) aufzuspüren und zu beseitigen:

$$\delta\nabla\Delta PR_{a,b}^{i,j}(t_{k_{m,n}}) = \nabla\Delta PR_{a,b}^{i,j}(t_{k_n}) - \nabla\Delta PR_{a,b}^{i,j}(t_{k_m}) \quad (2.28)$$

Durch die Differenzbildung wird die Anzahl der Beobachtungen reduziert. Die in den Beobachtungen enthaltenen Informationen über die absoluten Empfängerkoordinaten und die absoluten Anteile der systematischen Fehler sind eliminiert. Die auszuwertenden Beobachtungen werden auf Basislinien, bei denen es sich präziser formuliert um Raumvektoren handelt, reduziert.

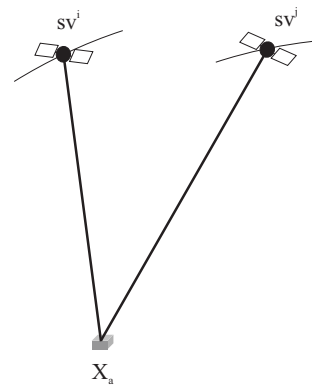
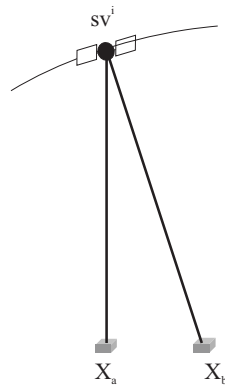


Abbildung 2.2: Einfachdifferenz zwischen Stationen    Abbildung 2.3: Einfachdifferenz zwischen Satelliten

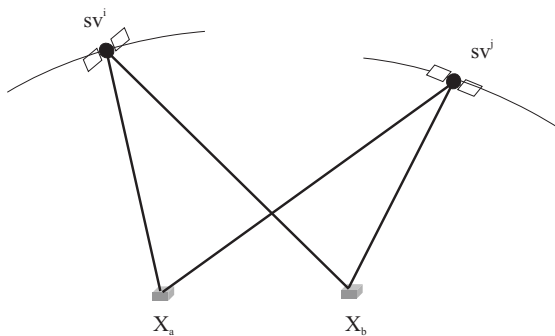


Abbildung 2.4: Doppeldifferenz

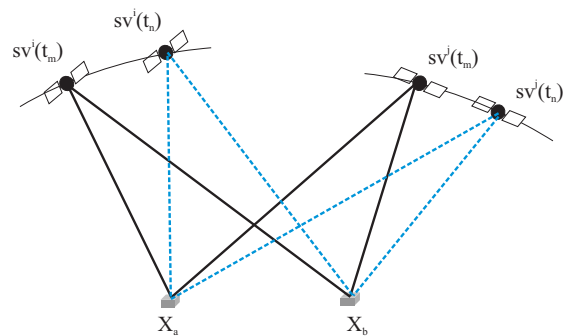


Abbildung 2.5: Dreifachdifferenz

#### 2.4.4 Vergleich der Auswertansätze

Die beiden Auswertansätze der Parameterelimination und der Parameterschätzung unterscheiden sich grundlegend in der Behandlung der Mehrdeutigkeiten sowie der systematischen Beobachtungsfehler. Die Parameterelimination ist die einfachere Vorgehensweise, da die identischen und hoch korrelierten Fehleranteile durch die Differenzbildung eliminiert werden. Die Anzahl der zu schätzenden Parameter ist geringer. Allerdings reduziert sich durch die Differenzbildung die Zahl der unabhängigen Beobachtungen erheblich. Dadurch ist es unvermeidlich, dass bei der Bildung der Doppeldifferenzen nicht immer alle verfügbaren Beobachtungen genutzt werden. Bei Netzmessungen kann es auch problematisch sein, linear unabhängige Basislinien zu bilden. Durch die Differenzbildung werden mathematische Korrelationen eingeführt, die sich in der Kovarianzmatrix nur schwer vollständig modellieren lassen. Die vollbesetzte Kovarianzmatrix zieht wiederum einen hohen Rechenaufwand nach sich. Die mit wachsenden Stationsabständen abnehmende Korrelation der atmosphärischen Fehler hat Residuen nach der Differenzbildung zur Folge, die die Mehrdeutigkeitslösung letztendlich unmöglich machen.

Durch undifferenzierte Beobachtungen werden dagegen die Trägerphasenbeobachtungen physikalisch besser repräsentiert. Die systematischen Fehler können individuell und flexibel modelliert werden. So können je nach dem vorhandenen Wissen über das Uhrverhalten die Uhrfehler schlicht als weißes Rauschen epochenweise mit einem unabhängigen Bias-Term modelliert werden, was auch als implizites Differenzieren bezeichnet wird (King et al. 1987). Im Gegensatz zum expliziten Differenzieren können dabei immerhin noch die statistischen Parameter dieses Modells vorgegeben werden. Sind dagegen genauere Informationen zum Uhrverhalten verfügbar, wie z.B. bei einem externen Frequenznormal, können auch Parametermodelle für ein Uhrpolynom verwendet und dessen Koeffizienten geschätzt werden. Dadurch entfällt auch die Notwendigkeit exakt zeitgleicher Beobachtungen aller Empfänger. Allerdings hängt die Leistungsfähigkeit dieses Ansatzes entscheidend davon ab, dass alle systematischen Fehler modelliert und erwartungstreu geschätzt werden.



Die geringere Anzahl an Beobachtungen und zu schätzenden Parametern ist kein entscheidender Vorteil für die Parameterelimination. Der Rechenaufwand zur Schätzung der globalen Parameter unterscheidet sich kaum vom Ansatz der undifferenzierten Beobachtungen. Korrelationen müssen nicht konstruiert werden, eine rigorose Ausgleichung ist möglich.

Während bei der Parameterschätzung bereits absolute Koordinaten für den Empfänger berechnet werden, müssen die mit den differenzierten Beobachtungen berechneten Basisvektoren an ein absolutes Datum angeschlossen werden.

Bei der Verwendung identischer Beobachtungsdaten führen beide Auswertansätze zu vergleichbaren Ergebnissen, sofern die Uhren richtig modelliert und der Rangdefekt richtig beseitigt wurde. Die Verwendung differenzierter Beobachtungen unterliegt jedoch größeren Einschränkungen hinsichtlich des Messkonzeptes, der Größe des Messgebietes und der Anzahl der Empfänger. Da aus den Modellparametern der systematischen Fehler zusätzliche Informationen gewonnen werden können, ist die Parameterschätzung für die in dieser Arbeit angestrebte Referenzstationsvernetzung von entscheidendem Vorteil.

## 2.5 Ausgleichungs- und Filterverfahren

Mit der Trägerphasen-Beobachtungsgleichung (2.9) liegt das funktionale Modell für die Ausgleichung der GPS-Beobachtungen vor (Kap. 2.2). Die mit dem Ausgleichungsmodell verbundenen Probleme wurden in Kap. 2.3 und in Kap. 2.4 erläutert. Die Entscheidung, die Auswertung auf der Basis undifferenzierter Beobachtungen vorzunehmen, wurde in Kap. 2.4 begründet. In diesem Abschnitt werden die Gleichungen des Kalman-Filters als Grundlage der Echtzeitauswertungen und Zustandsschätzung zusammengestellt und ein Überblick über die in der Auswertung verwendeten stochastischen Prozesse gegeben.

### 2.5.1 Rekursive Parameterschätzung

Im Postprocessing werden die umfangreichen GPS-Beobachtungsdatensätze mit einem linearen Schätzverfahren nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen (Gauß-Markov-Modell). Wenn alle Beobachtungen vorliegen, werden die Daten entweder in einem Stück prozessiert oder die Normalgleichungen für aufeinanderfolgende Datenblöcke berechnet und diese dann aufsummiert. Dieser als Summierung von Normalgleichungen bekannte Algorithmus setzt unkorrelierte Beobachtungssätze voraus und ist vorteilhaft einsetzbar, wenn zur Bestimmung weniger Unbekannter sehr viele Beobachtungen vorliegen, wie es bei langen statischen Beobachtungen zutrifft. Mathematisch äquivalent ist die sequentielle Ausgleichung (Krakiwsky 1992). Im Gegensatz zu den Beobachtungen dürfen die unbekannt Parameter nicht zeitabhängig sein. Der Algorithmus funktioniert auch dann, wenn nur wenig mehr Beobachtungen als Unbekannte vorliegen. Damit ist es möglich, die Stationskoordinaten von z.B. Monitorstationen in einem Permanentstationsnetz kontinuierlich aufzudatieren.

Für die optimale Schätzung zeitvariabler Parameter wird der Einsatz von Filter-Verfahren erforderlich. Dies trifft für kinematische Anwendungen zu, bei denen sich der zu positionierende Empfänger bewegt. Für statischen GPS-Beobachtungen gilt dies ebenfalls, wenn die durch längere Beobachtungszeiten bedingten Zustandsänderungen der systematischen Fehleranteile gezielt als zeitabhängiger Prozess modelliert werden sollen.

Der bekannteste rekursive Schätzalgorithmus ist das Kalman-Filter. Er lässt sich als Verallgemeinerung der sequentiellen Ausgleichung herleiten (Krakiwsky 1992). Charakteristisch für die Kalman-Filterung ist, dass der Zustandsvektor alle Informationen aus den vorhergehenden Beobachtungen bis einschließlich der gegenwärtigen Epoche akkumuliert. Der Zustandsvektor kann über die folgenden Parameter hinaus

- 3 Koordinaten je Station
- 1 Empfängeruhrparameter je Epoche
- 1 Troposphärenparameter je Station
- bis zu 6 Kepler-Parameter je Satellit
- Satellitenuhrparameter je SV (Polynom 2. O.)
- 1 Mehrdeutigkeitsparameter je Station und Satellit

noch weitere Parameter z.B. für die Laufzeitverzögerungen in der Empfängerhardware oder eines Ionosphärenschichtmodells umfassen. Die Aufdatierung ist besonders effektiv bei wenigen Beobachtungen und einem großem Zustandsvektor, da die Größe der zu invertierenden Matrix (*inv* ( $\dim n \times n$ )) von der Beobachtungszahl abhängt. Das Kalman-Filter ermöglicht im Gegensatz zur sequentiellen Ausgleichung die Prädiktion sowohl des Zustandsvektors als auch der zugehörigen Kovarianzmatrix.

Die nachfolgende Beschreibung des Kalman-Filter-Algorithmus ist Wübbena (1991) und Schrick (1977) entnommen. Die verwendete Notation folgt der Ausgleichungsrechnung, nicht der in der Filtertechnik (z.B. Brammer, Siffing (1975), Föllinger, Franke (1982), Gelb (1974)) üblichen Darstellung.

Das Kalman-Filter setzt sich aus einem funktionalen Modell und einem dynamischen Modell zusammen. Das funktionale Modell in Form der Mess- oder Beobachtungsgleichung verknüpft die Beobachtungen und die unbekannt Parameter in jeder Epoche ( $k$ ) miteinander.

$$\mathbf{l}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) - \mathbf{v}(t) \quad (2.29)$$

mit

- $\mathbf{l}(t)$  Vektor der linearisierten Beobachtungen,  $\dim(n)$
- $\mathbf{A}(t)$  Design- oder Konfigurationsmatrix,  $\dim(n,u)$
- $\mathbf{v}(t)$  Vektor der Beobachtungsverbesserungen,  $\dim(n)$

Das dynamische Prozessmodell beschreibt die funktionalen Beziehungen zwischen den Parametern und verknüpft die Beobachtungen der aufeinanderfolgenden Epochen miteinander. Um die Zustandsgrößen im Kalman-Filter zu schätzen, wird ein lineares dynamisches System vorausgesetzt:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{w}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{u}(t) \quad (2.30)$$

mit

- $\mathbf{x}(t)$  Vektor der unbekannt Zustandsgrößen,  $\dim(u)$
- $\dot{\mathbf{x}}(t)$  Vektor der ersten Ableitungen der Zustandsgrößen nach der Zeit,  $\dim(u)$
- $\mathbf{F}(t)$  System- oder Dynamikmatrix,  $\dim(u,u)$
- $\mathbf{D}(t)$  Störeingangsmatrix,  $\dim(u,r)$
- $\mathbf{w}(t)$  Vektor der stochastischen Systemstörungen,  $\dim(r)$
- $\mathbf{G}(t)$  Steuereingangsmatrix,  $\dim(u,p)$
- $\mathbf{u}(t)$  Vektor der deterministischen Stellgrößen,  $\dim(p)$

Die allgemeine kontinuierliche Lösung der Zustandgleichung (2.30) lautet

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{T}(t, t_0)\mathbf{x}(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{T}(t, \tau)\mathbf{D}(\tau)\mathbf{w}(\tau)d\tau + \int_{t_0}^t \mathbf{T}(t, \tau)\mathbf{G}(\tau)\mathbf{u}(\tau)d\tau \quad (2.31)$$

Die Transitionsmatrix  $\mathbf{T}(t, t_0)$  ist als Lösung des homogenen Differentialgleichungssystems

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{x}(t) \quad (2.32)$$

zu bestimmen, das die allgemeine diskrete Form annimmt:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{T}_{k-1}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}_{k-1}\mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{C}_{k-1}\mathbf{w}_{k-1} \quad (2.33)$$

mit

$$\mathbf{T}_{k-1} = \mathbf{T}(t_k, t_{k-1}) \quad (2.34)$$

$$\mathbf{B}_{k-1} = \int_{t_0}^{t_k} \mathbf{T}(t_k, \tau) \mathbf{G}(\tau) \mathbf{u}(\tau) d\tau \quad (2.35)$$

$$\mathbf{C}_{k-1} = \int_{t_0}^{t_k} \mathbf{T}(t_k, \tau) \mathbf{D}(\tau) \mathbf{w}(\tau) d\tau \quad (2.36)$$

Die rekursive Parameterschätzung erfolgt im Kalman-Filter in zwei Schritten. Zunächst wird der Zustandsvektor mit der Kovarianzmatrix  $\mathbf{Q}_k$  für die nächste Epoche prädiziert, die prädizierten Größen sind durch den oberen Index (+) gekennzeichnet:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \mathbf{T}_{k-1}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}_{k-1}\mathbf{u}_{k-1} \quad (2.37)$$

$$\mathbf{Q}_k^+ = \mathbf{T}_{k-1}\mathbf{Q}_{k-1}\mathbf{T}_{k-1}^T + \mathbf{C}_{k-1}\mathbf{Q}_{w_{k-1}}\mathbf{C}_{k-1}^T \quad (2.38)$$

Ausgehend von den erwartungstreu geschätzten Startwerten  $(x_0, \mathbf{Q}_0)$  der Zustandsgrößen werden die Systemgleichungen mit Hilfe der Beobachtungen jeder neuen Epoche aufdatiert:

$$\mathbf{Q}_k = \mathbf{Q}_k^+ - \mathbf{Q}_k^+ \mathbf{A}_k^T (\mathbf{A}_k \mathbf{Q}_k^+ \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}_{ll_k})^{-1} \mathbf{A}_k \mathbf{Q}_k^+ \quad (2.39)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^+ + \mathbf{Q}_k^+ \mathbf{A}_k^T (\mathbf{A}_k \mathbf{Q}_k^+ \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}_{ll_k})^{-1} \mathbf{l}_k - \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_k^+ \quad (2.40)$$

## 2.5.2 Stochastische Prozesse

Die Zufallsgrößen stochastischer Prozesse werden im Kalman-Filter geschätzt. Das Verhalten stochastischer Prozesse lässt sich für die Zukunft nicht exakt vorhersagen, ihre zeitliche Entwicklung wird deshalb mit statistischen Mitteln beschrieben (Atherton, Borne 1992).

Unter den stochastischen Prozessen gibt es drei, die im folgenden behandelt werden, weil deren Eigenschaften entweder jenen natürlicher (physikalischer) Prozesse nahekommen oder aus theoretischer Sicht nützlich sind. Zudem müssen die Prozesse stationär sein und sich durch ein lineares Modell beschreiben lassen. Es wird unterstellt, dass die Zufallsgrößen der Normalverteilung folgen.

Bei den drei Prozessen handelt es sich um den Gauß-Markov-Prozess, das weiße Rauschen und das integrierte weiße Rauschen, das auch als random walk bekannt ist. Alle Störparameter der Beobachtungsgleichung lassen sich durch einen der drei Prozesse modellieren (Tab. 2.2).

### 2.5.2.1 Gauß-Markov-Prozess

Gauß-Markov-Prozesse sind besonders zur Beschreibung natürlicher, langsam variierender physikalischer Prozesse geeignet, die z.B. charakteristische Abklingfunktionen aufweisen. In einer Reihe von Zufallsereignissen hängt die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines zukünftigen Ereignisses nur vom gegenwärtigen Systemzustand ab, nicht von der Vergangenheit. Nur zwischen unmittelbar benachbarten Werten besteht eine direkte Korrelation

Die Zufallsgröße  $x(t)$  eines eindimensionalen Gauß-Markov-Prozesses lässt sich nach Schrick (1977) und Wübbena (1991) als Zustandsgröße eines durch weißes Rauschen angeregten linearen dynamischen Systems darstellen. Mit der Konstanten

$$\beta = \frac{1}{T}$$

Tabelle 2.2: Anwendung stochastischer Prozesse auf die Störparameter der Beobachtungsgleichung (Wübbena, Willgalis 2001)

Stochastischer Prozess	Anwendung
Weißes Rauschen	Empfänger- u. Satellitenuhrfehler Messrauschen Mehrdeutigkeiten
Integriertes weißes Rauschen	Laufzeitverzögerungen in der Empfänger- u. Satelliten-Hardware
Gauß-Markov-Prozess	Orbit (3D-Prozess) Ionosphäre Troposphärischer Maßstab Mehrwegeausbreitung

als Kehrwert der Korrelationszeit  $T$  folgt die Systemgleichung

$$\dot{x}(t) = -\beta x(t) + w(t). \quad (2.41)$$

Vorausgesetzt werden die Stationarität des Gauß-Markov-Prozesses sowie die Normalverteilung der Zufallsgrößen  $x(t)$ ,

$$x(0) \sim N(0, \sigma_x^2)$$

die auch für das Prozessrauschen  $w(t)$  mit  $q$ , der Spektraldichte des weißen Rauschens, gilt:

$$w(t) \sim N(0, q)$$

Die Varianz der Zufallsgröße beträgt:

$$\sigma_x^2 = \frac{q}{2\beta} \quad (2.42)$$

Die Prädiktion der Zustandsgröße  $\dot{x}(t)$  erfolgt mit der Transitionsmatrix in Form einer Exponentialfunktion:

$$T(t + \Delta t) = e^{-\beta|\Delta t|} \quad (2.43)$$

Der Gauß-Markov-Prozess wird beschrieben durch seine Autokovarianzfunktion (AKF)

$$\Phi_{XX}(\tau) = \sigma_x^2 e^{-\beta|\tau|} \quad (2.44)$$

mit den Prozessparametern Varianz  $\sigma_x^2$  und Korrelationslänge  $\beta$ .

Der eindimensionale Gauß-Markov-Prozess lässt sich zu einem mehrdimensionalen Prozess erweitern, wenn die Zufallsgrößen sowohl orts- als auch zeitabhängig sind. Die Ortsabhängigkeit kann zweidimensional (Breite, Länge) oder dreidimensional (Breite, Länge, Höhe) beschrieben werden. Anwendungsbeispiele sind die Modellierung des Orbitfehlers und des ionosphärischen Fehlers für eine Empfänger-Satelliten-Kombination.

### 2.5.2.2 Integriertes weißes Rauschen

Bei dem integrierten weißen Rauschen handelt es sich um einen Sonderfall des Gauß-Markov-Prozesses, bei dem die Korrelationszeit  $T$  gegen unendlich wächst und damit  $\beta$  gegen Null geht (Wübbena 1991). Wegen  $e^0 = 1$  gilt dann

$$T(t + \Delta t) = 1 \quad (2.45)$$

$$\sigma_w^2(\Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} q d\tau = \sigma_x^2 \Delta t \quad (2.46)$$

Aus der Integration von Gaußschem weißen Rauschen resultiert ein Wiener-Prozess (Brownsche Bewegung, Random Walk) (Brown, Hwang 1997). Bei einem Mittelwert von Null wächst die Varianz dabei mit der Zeit gegen unendlich.

### 2.5.2.3 Weißes Rauschen

Zweiter Sonderfall des Gauß-Markov-Prozesses, bei der die Korrelationszeit  $T$  gegen Null geht und der Parameter der Transitionsmatrix  $\beta$  gegen unendlich wächst (Wübbena 1991):

$$T(t + \Delta t) = 0 \quad (2.47)$$

$$\sigma_w^2(\Delta t) = q\delta(0) \quad (2.48)$$

Die Dirac'sche Deltafunktion  $\delta(\tau)$  bewirkt, dass aufeinanderfolgende Zufallsgrößen nicht mehr miteinander korreliert sind ( $R(0) = 1, R(\tau) = 0$  für beliebige  $\tau$ ). Es resultiert ein, allerdings nur theoretisch möglicher, reiner Zufallsprozess. Die Zufallsvariablen sind eine Folge voneinander unabhängiger, identisch verteilter Variablen mit konstantem Mittelwert und Varianz (Stationarität zweiter Ordnung). Die Anwendung eines Modells mit weißem Rauschen auf einen Zufallsparameter führt zur impliziten Eliminierung dieses Parameters.



## 3 Präzise Differentielle GPS-Echtzeitpositionierung

### 3.1 Einführung

Für Navigationsaufgaben entwickelt, bietet GPS die Möglichkeit, mit nur einer Epoche aus Codemessungen zu mindestens vier Satelliten in Verbindung mit der Broadcast Message eine absolute Position zu berechnen. Damit ist GPS grundsätzlich ein Echtzeitpositionierungsverfahren. Die im Standard Positioning Service (SPS) erreichbare Absolutgenauigkeit ist für viele Anwendungen jedoch nicht ausreichend. Nach Deaktivierung von SA am 2. Mai 2000 beträgt die Standardabweichung der absolute Lage rund 5 m, während sie mit aktiviertem SA bei  $\sigma_{dr} = 35$  m lag (Abb. 3.1), der Standard Positioning Service jedoch nur 100 m garantierte. Die Genauigkeit der Höhenkomponente reduzierte sich nach SA-Deaktivierung von  $\sigma_{dh} = 65$  m auf bis zu 5 m (Abb. 3.2).

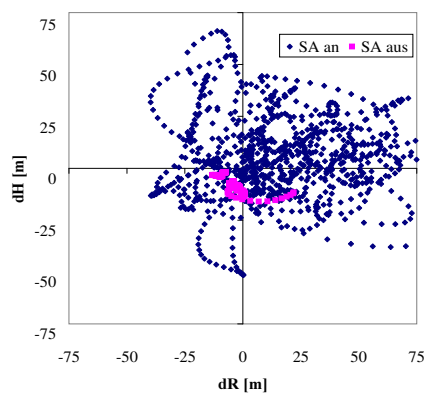


Abbildung 3.1: Genauigkeit der horizontalen Absolutpositionierung je 4 h vor und nach der SA-Deaktivierung

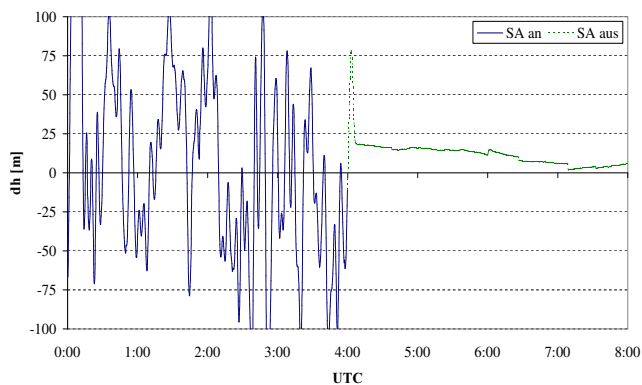


Abbildung 3.2: Auswirkung der SA-Deaktivierung am 2. Mai 2000 um 4:00 UTC auf die vertikale Absolutpositionierung

Für höhere Genauigkeitsanforderungen sind relative und, wenn Echtzeitlösungen angestrebt werden, differentielle Beobachtungstechniken auf der Basis von Trägerphasenmessungen erforderlich. Auf der Grundlage der in Kap. 2 beschriebenen GPS-Beobachtungs- und Auswerteverfahren werden im vorliegenden Kapitel die Grundlagen der präzisen differentiellen GPS-Positionierung in Bezug auf eine einzelne Referenzstation erläutert. Einleitend werden die wesentlichen Konzepte zur Echtzeitpositionierung definiert (Kap. 3.2). Die für das differentielle Verfahren notwendigen Codekorrekturen werden in Kap. 3.3 hergeleitet. Weil dies für Codekorrekturen anschaulich möglich ist, werden unterschiedliche Repräsentationsformen der Korrekturen diskutiert. Die Berechnung von Trägerphasenkorrekturen folgt in Kap. 3.4. Zur Übertragung von Korrekturen bedarf es eines international vereinbarten öffentlichen Standards, um die Vorteile des DGPS-Prinzips nutzen zu können. Das am weitesten verbreitete Korrekturdatenformat, der RTCM SC-104 Standard, wird mit seinen gegenwärtigen Varianten abschließend in Kap. 3.5 beschrieben. Das Kap. 3 gibt damit den allgemein verbreiteten Stand der Verfahren zur GPS-Echtzeitpositionierung wieder.

### 3.2 Definitionen und Positionierungskonzepte

Im folgenden wird zwischen den Beobachtungsverfahren relatives GPS und differentielles GPS unterschieden. Im Gegensatz zur Absolutpositionierung bezeichnet relatives GPS das Grundprinzip, auf mindestens zwei Stationen zeitgleich mit GPS-Empfängern zu beobachten, wobei die Koordinaten einer

Station bekannt sind. Messung und Auswertung der Beobachtungen müssen hierbei nicht zeitgleich erfolgen. Die Beobachtungen werden auf jeder Station gesammelt, anschließend zusammengeführt und im Postprocessing ausgewertet (Abb. 3.3). Dieses relative Beobachtungsverfahren wird im Allgemeinen angewendet, um höhere Genauigkeiten zu erzielen, was die Verwendung von Trägerphasenmessungen impliziert.

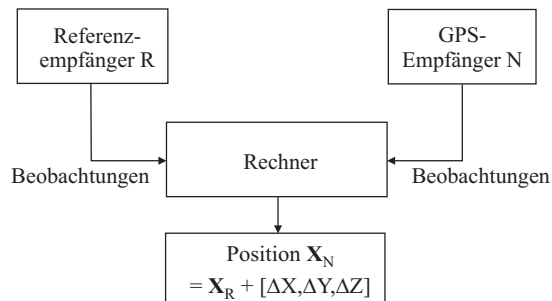


Abbildung 3.3: Relatives GPS

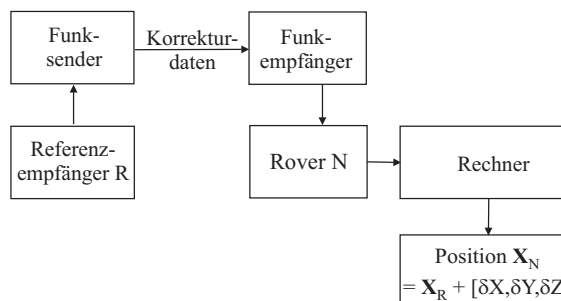


Abbildung 3.4: Differentielles GPS

Bei differentiellen GPS (DGPS)-Verfahren wird die relative Beobachtungstechnik mit mindestens zwei Stationen angewendet, die Auswertung erfolgt jedoch zeitgleich, d.h. in Echtzeit. Dazu müssen die Beobachtungen des Referenzempfängers auf einer Station mit bekannten Koordinaten  $\mathbf{X}_R$  durch ein geeignetes Kommunikationsverfahren an die GPS-Empfänger der zu positionierenden Stationen übertragen werden. Deren Positionen  $\mathbf{X}_N$  werden aus korrigierten Beobachtungen des Rovers berechnet (Abb. 3.4). Damit erhöht sich das Fehlerbudget der Relativbeobachtungen um den aus der Übertragungszeit, dem Datenalter, resultierenden Fehler. Dieses Verfahren wurde zuerst für Codebeobachtungen entwickelt, die Bezeichnung DGPS wird deshalb synonym mit differentiellen Codelösungen verwendet und schließt die Echtzeitauswertung ein.

Die Realisierung des differentiellen Verfahrens mit Trägerphasenbeobachtungen ist schwierig, da Beobachtungen über viele Epochen benötigt werden, um die systematischen und zufälligen Beobachtungsfehler zu minimieren und die Mehrdeutigkeiten der Trägerphasenmessungen sicher zu lösen. Erst mit Weiterentwicklungen der Algorithmen, leistungsfähigeren Rechnern und mobilen Datenübertragungsverfahren, die eine ausreichende Bandbreite und Reichweite bieten, ließ sich das präzise differentielle GPS (PDGPS)-Verfahren entwickeln. Um die Echtzeitfähigkeit zu betonen, wird manchmal noch die Abkürzung RT (Real Time) vor die Verfahrensbezeichnung gesetzt (RT-PDGPS). Die nach der Beobachtungsgröße gewählte Bezeichnung carrier phase differential GPS (CP-DGPS) hat sich nicht durchgesetzt. Stattdessen wurde der Begriff Real Time Kinematic (RTK) für die ersten aus einem Empfängerpaar bestehenden trägerphasenbasierten Echtzeitpositionierungssysteme geprägt (Allison et al. 1994). Die Bezeichnung ist insofern irreführend, als die differentiellen Verfahren unabhängig von statischen oder kinematischen Anwendungen sind.

Im klassischen DGPS-Beobachtungsverfahren sendet der Referenz- oder Basisempfänger auf der Station mit den bekannten Koordinaten seine Beobachtungen an den zweiten Empfänger auf dem zu koordinierenden Punkt. Dieser wird als mobiler Empfänger oder Rover bezeichnet, weil er sich beliebig um die Referenzstation bewegen kann, wobei die Messungen gleichermaßen im statischen wie auch kinematischen Modus erfolgen können. Der Rover berechnet dann die DGPS-Lösung. Die umgekehrte Vorgehensweise, wenn der Rover seine Beobachtungen an die Referenzstation sendet und diese die Auswertung durchführt, wird als inverses (reverses) DGPS bezeichnet (Abb. 3.5). Dieses Verfahren bietet sich an, wenn der Rover über keine ausreichende Rechnerausstattung verfügt oder der Rover selbst die Positionsinformation gar nicht benötigt, z.B. bei ferngesteuerten Fahrzeugen oder Bojen. Bewegen sich während der Messung sowohl der Rover als auch die Referenzstation (z.B. Betanken von Flugzeugen in der Luft), handelt es sich um ein relatives DGPS-Verfahren. Dabei wird statt der absoluten Position



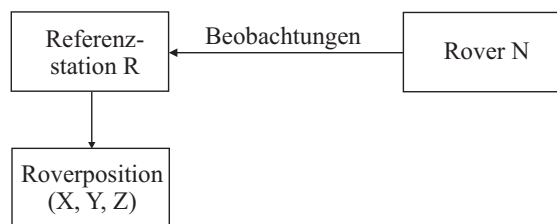


Abbildung 3.5: Inverses DGPS

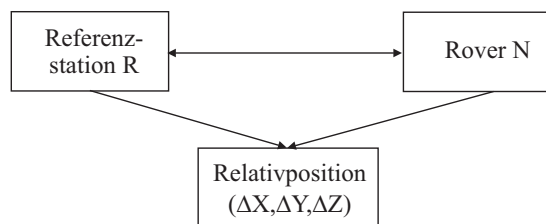


Abbildung 3.6: Relatives DGPS

nur der relative Abstand zwischen beiden Stationen gesucht (Abb. 3.6). Die DGPS-Berechnung kann klassisch oder invers erfolgen.

Die Referenzstation kann für relative GPS-Messungen und für DGPS-Messungen entweder temporär für ein Projekt aufgebaut werden oder auf einem Punkt dauerhaft als Permanentstation eingerichtet sein. Verfügt diese Permanentstation über eine Einrichtung zur Korrekturdatenübertragung, so spricht man von einer aktiven Referenzstation. Werden die Permanentstationsdaten vom Betreiber nicht nur für eigene Zwecke genutzt, sondern auch anderen GPS-Anwendern zur Verfügung gestellt, handelt es sich um einen Dienst.

Die Reichweite einer aktiven Referenzstation ist begrenzt. Mit zunehmender Entfernung des Rovers von der Referenzstation sinkt die Korrelation der systematischen entfernungsabhängigen GPS-Fehler, die durch das differentielle Beobachtungsverfahren dann nicht mehr korrigiert werden können. Für Einfrequenz-Trägerphasenbeobachtungen ist das Arbeitsgebiet einer Referenzstation auf wenige Kilometer begrenzt, für Zweifrequenz-Trägerphasenbeobachtungen auf wenige Zehnerkilometer. Codebasierte DGPS-Lösungen sind über mehrere 100 km möglich, allerdings sinkt die Positionierungsgenauigkeit mit zunehmenden Abstand. Eine Entfernungsgrenze ergibt sich hier aus der erreichbaren DGPS-Genauigkeit, die unterhalb der nach Deaktivierung der Selective Availability (SA) möglichen Absolutpositionierungsgenauigkeit bleiben sollte. Eine Vergrößerung der Stationsabstände ist nur mit Multistationslösungen möglich, bei denen Korrekturen mehrerer Referenzstationen einbezogen werden. Diese als Vernetzung bezeichneten Lösungen sind Gegenstand von Kap. 4.

Eine weitere Grenze für den Arbeitsbereich einer Referenzstation ergibt sich aus der Sendereichweite des zur Korrekturdatenübertragung eingesetzten Kommunikationsmediums, die als Teil des Referenznetzsegmentes in Kap. 5.2 behandelt werden. Die Sendereichweite reicht von wenigen Kilometern bei den in RTK-Systemen eingesetzten UHF-Funksystemen mit sehr geringer Sendeleistung bis zu mehreren Zehnerkilometern bei VHF-Korrekturdatensendern und UKW-Rundfunksendern. Zellulare Strukturen mit vielen flächenhaft verteilten Sendern ermöglichen den Rundfunkanstalten die Überdeckung größerer Arbeitsgebiete, entsprechend ist auch die Korrekturdatenübertragung per Mobilfunk praktisch ohne Reichweitenbegrenzung.

Ein RTK-System umfasst zwei GPS- und Funkausrüstungen, je eine für den Rover und die Basisstation. Während der Messungen muss ein Nutzer die Basisstation im Arbeitsgebiet selbst betreiben und diese aufgrund der geringen Reichweite gegebenenfalls mehrmals umsetzen. Bei entsprechend vielen Anwendern ist es wirtschaftlicher, die Basisstation von nur einem Betreiber aufbauen zu lassen, der die Übertragung von Korrekturdaten als Dienst anbietet. Dieser Dienst kann dann mehrere Referenzstationen umfassen, die entweder unabhängig voneinander arbeiten oder, wie bereits mit Hinweis auf Kap. 4 erwähnt, verbesserte Korrekturdaten aus Echtzeit-Multistationslösungen ableiten. Der Aufbau solcher Dienste mit ausgewählten Beispielen wird in Kap. 5 erläutert.

Kern der vorliegenden Arbeit ist die präzise Echtzeitpositionierung. Insofern beziehen sich alle Beobachtungs- und Auswertetechniken auf Trägerphasenmessungen mit Mehrdeutigkeitslösungen. Den eigenen Untersuchungen liegt das in Kap. 2.4.2 vorgestellte Auswerteverfahren der Parameterschätzung zugrunde, das in der PDGPS-Software GNNET der Firma Geo++ realisiert ist. Solange keine Verwechs-

lungen zu befürchten sind, werden auch Konzepte und Verfahren, denen die Parameterelimination oder codebasierte DGPS-Lösungen zugrunde liegen, ohne besonderen Hinweis einbezogen. Gerade die Entwicklung der DGPS-Referenzstationsdienste bietet konzeptionelle Vergleichsmöglichkeiten zu den noch zu entwickelnden PDGPS-Referenznetzen.

### 3.3 Code-Korrekturen

#### 3.3.1 Übersicht

Die absolute dreidimensionale Position eines Empfängers lässt sich aus dessen Code-Beobachtungen zu mindestens vier GPS-Satelliten berechnen. Steht der Empfänger auf einem Referenzpunkt mit bekannten, aus langen Beobachtungsreihen abgeleiteten Koordinaten im GPS-Bezugssystem, werden zwischen der Solllösung und den aus realen Beobachtungen abgeleiteten Lösungen unweigerlich Differenzen auftreten. Diese beruhen zum einen auf Fehlern, die allein die Referenzstation betreffen (Mehrwegeausbreitung, Messrauschen), zum anderen auf Fehlern, die für die Referenzstation und alle in einem gewissen Umkreis befindlichen GPS-Empfänger gleichermaßen zutreffen (Orbit, Ionosphäre, Troposphäre). Berechnet man nun aus dem Vergleich zwischen Soll- und Ist-Lösung des Referenzstationsempfängers einen Korrekturwert, können mit diesem Wert die Lösungen der umgebenden Empfänger verbessert werden.

Den einfachsten Fall stellt die Verwendung von Korrekturen im Positionsraum dar, d.h. die Berechnung von Korrekturen direkt aus den Koordinatenlösungen (Kap. 3.3.2). Ein besseres, weil von der Satellitenkonstellation unabhängiges Verfahren ist die Berechnung von Korrekturen im Beobachtungsraum (Kap. 3.3.3). Die Nutzung von Korrekturen der Code- und Trägerphasenbeobachtungen ist die in der Praxis gegenwärtig verbreitete Vorgehensweise. Sowohl bei den Positions- als auch bei den Beobachtungskorrekturen werden die verschiedenen GPS-Fehlerkomponenten zu einem Korrekturwert zusammengefasst (lumped oder composite corrections). Anstatt der skalaren Korrekturen sind grundsätzlich auch vektorielle Korrekturen möglich. Dabei werden die einzelnen Fehlerkomponenten direkt modelliert und ein Zustandsvektor generiert (Kap. 3.3.4), mit dem die auf einen Rover wirkenden Fehlerkomponenten korrigiert werden. Diese Möglichkeit wurde in der Praxis bislang nur für Codemessungen in großräumigen Referenzstationsnetzen realisiert. Für die präzisen Echtzeitpositionierung handelt es sich dagegen um ganz neue Entwicklungen, die im Zusammenhang mit der Vernetzung von Referenzstationen in Kap. 4 erläutert werden.

Die drei Korrekturverfahren lassen sich am anschaulichsten an dem codebasierten DGPS-Verfahren darstellen (Kap. 3.3), sie gelten konzeptionell auch für die trägerphasenbasierten PDGPS-Verfahren, die im anschließenden Kap. 3.4 beschrieben werden. Eng verknüpft mit der Entwicklung der differentiellen Positionsbestimmung in Echtzeit sind die Korrekturdatenformate, von denen der RTCM SC-104 Standard die größte Bedeutung für die Praxis gewonnen hat und in Kap. 3.5 näher beschrieben wird.

#### 3.3.2 Korrekturen im Positionsraum

Die relative GPS-Beobachtungstechnik dient dazu, die Position eines Nutzers  $\mathbf{X}_N$  in Bezug auf eine koordinatenmäßig bekannte Referenzstation  $\mathbf{X}_{RS}$  zu bestimmen. Durch Berechnung des Basisvektors  $\Delta\mathbf{X}$  aus den Beobachtungen der Referenzstation und des Rovers folgen die Koordinaten des Rovers durch Anhängen des Basisvektors an die Referenzstationskoordinaten:

$$\mathbf{X}_N = \mathbf{X}_{RS_{soll}} + \Delta\mathbf{X} \quad (3.1)$$

$$\Delta\mathbf{X} = [\Delta X, \Delta Y, \Delta Z]^T \quad (3.2)$$

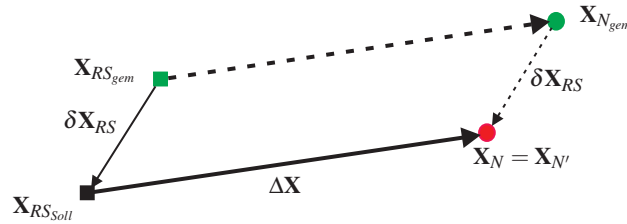


Abbildung 3.7: Äquivalenz der Neupunktbestimmung durch relative Beobachtungen und differentielle Positionskorrekturen

Die Koordinaten des Rovers werden in dem Datum der Referenzstation bestimmt. Ungenauigkeiten in der Absolutposition der Referenzstation pflanzen sich nach (3.1) in die Absolutposition des Rovers fort. Da jede so bestimmte Roverposition dem gleichen Fehler unterliegt, bleibt die relative Genauigkeit zwischen den Roverstationen unbeeinflusst. Erst bei Absolutfehlern der Referenzstation über 10 m ist mit Verzerrungen der relativen Stationsabstände zu rechnen.

Für das differentielle GPS-Verfahren wird unterstellt, dass die Messfehler des Referenzempfängers weitgehend identisch sind mit den Messfehlern des Rovers. Die Subtraktion der aus Messungen abgeleiteten Referenzstationsposition von der Sollposition ergibt die differentielle Korrektur  $\delta \mathbf{X}_{RS}$ ,

$$\delta \mathbf{X}_{RS} = \mathbf{X}_{RS_{soll}} - \mathbf{X}_{RS_{gem}} \quad (3.3)$$

$$\delta \mathbf{X}_{RS} = [\delta x, \delta y, \delta z]^T \quad (3.4)$$

die zur gemessenen Roverposition addiert wird, um die differentiiell korrigierte Nutzerposition  $\mathbf{X}_{N'}$  zu erhalten (Abb. 3.7):

$$\mathbf{X}_{N'} = \mathbf{X}_{N_{gem}} + \delta \mathbf{X}_{RS} \quad (3.5)$$

Die differentiiell korrigierte Nutzerposition  $\mathbf{X}_{N'}$  ist identisch mit der aus Relativbeobachtungen abgeleiteten Nutzerposition  $\mathbf{X}_N$ , wie sich durch eine alternativen Herleitung beweisen lässt, bei der der relative Basisvektor  $\Delta \mathbf{X}$  zur gemessenen Referenzstationsposition addiert wird:

$$\mathbf{X}_{N_{gem}} = \mathbf{X}_{RS_{gem}} + \Delta \mathbf{X} \quad (3.6)$$

Werden die Gleichungen (3.3) und (3.6) in (3.5) eingesetzt (Varner 2000),

$$\mathbf{X}_{N_{korr}} = \mathbf{X}_{RS_{gem}} + \Delta \mathbf{X} + \mathbf{X}_{RS_{soll}} - \mathbf{X}_{RS_{gem}} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{X}_{N'} = \mathbf{X}_N \quad (3.8)$$

zeigt sich die Äquivalenz der relativen und differentiiellen Positionierungstechnik. Abweichungen zwischen beiden Lösungen beruhen ausschließlich auf den bei Relativbeobachtungen üblicherweise längeren Beobachtungsreihen und Zeitverzögerungen, die aus der Datenübertragung resultieren.

Im Positionsraum ist der Korrekturansatz anschaulich und sehr einfach realisierbar. Es sind nur sehr geringe Datenmengen zu übertragen. Die Referenzstations- und Roversoftware kann unterschiedliche Auswertalgorithmen verwenden; allerdings müssen beide mit einer identischen Satellitenkonstellation arbeiten. Konstellationswechsel auf nur einer der beiden Stationen durch z.B. auf- oder untergehende Satelliten machen sich durch unvermeidbare Sprünge in den Koordinatenkomponenten bemerkbar. Damit sind Ansätze auf der Basis von Positionsraumkorrekturen für praktische Zwecke unbrauchbar.

Abbildung 3.8 zeigt das Ergebnis einer Untersuchung, in der die kinematische DGPS-Positionierung aus Positionskorrekturen, für die nur NMEA GGA-Datensätze zur Verfügung standen, gefordert war. Dargestellt sind die Abweichungen der differentiiell mit Positionskorrekturen verbesserten Lösungen für den

Messdachpfeiler 1006 von dessen Sollkoordinaten. Da die Messungen noch unter SA-Bedingungen erfolgten, stellen die differentiellen Lösungen mit Standardabweichungen von 16 m bzw. 9 m im Rechts- und Hochwert sowie 28 m in der Höhenkomponente durchaus eine Genauigkeitssteigerung um knapp über 50% gegenüber den Absolutlösungen dar, fallen jedoch weit ungünstiger aus als eine DGPS-Lösung mit Pseudostreckenkorrekturen. Ein Teil der verbleibenden hohen Abweichungen ist auf zeitliche Synchronisationsprobleme der NMEA-Datensätze zurückzuführen.

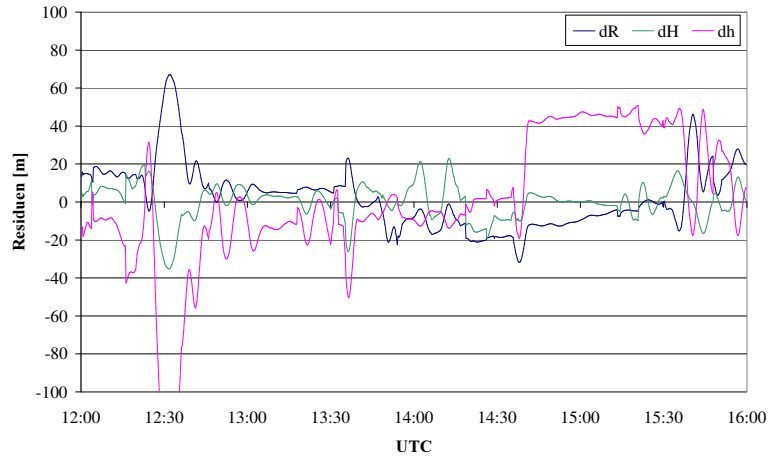


Abbildung 3.8: Abweichungen der differentiell mit Positionskorrekturen aus NMEA GGA-Datensätzen verbesserten Lösungen für Station 1006 von deren Sollkoordinate (Messungen unter SA-Bedingungen am 16.04.2000)

### 3.3.3 Korrekturen im Beobachtungsraum

Codekorrekturen auf der Basis von Koordinatendifferenzen erweisen sich, wie im vorhergehenden Abschnitt gezeigt, als ungeeignet zur DGPS-Positionierung, weil sie dieselbe Satellitenkonstellation für Referenzstation und Rover voraussetzen. Völlig unabhängig von dieser Einschränkung können Korrekturen der Pseudostreckenbeobachtungen zur DGPS-Positionierung genutzt werden. Referenzstation und Rover können auch mit unterschiedlichen Satelliten arbeiten, solange Beobachtungskorrekturen für mindestens vier gemeinsam beobachtete Satelliten vorliegen. Die Berechnung der Pseudostreckenkorrekturen (PRC) ist allerdings aufwendiger als die der Positionskorrekturen. Die nachfolgende Herleitung orientiert sich am RTCM SC-104 Standard (RTCM 2001), der Formate zur Korrekturdatenübertragung definiert und in Kap. 3.5 näher erläutert wird.

Zur Ableitung der Pseudostreckenkorrekturen wird von der bereits bekannten Beobachtungsgleichung (2.7) einer Pseudostrecke  $PR_{RS}^j(t_k)$ , die von der Referenzstation  $RS$  zum Satelliten  $j$  zur Epoche  $t_k$  gemessen wurde,

$$PR_{RS}^j(t_k) = |\mathbf{R}_{RS}^j(t_k)| + c(\delta t_{RS} - \delta t^j) + \delta \mathbf{o}_{RS}^j + \dots \quad (3.9)$$

mit der geometrischen Entfernung  $|\mathbf{R}_{RS}^j(t_k)|$  sowie dem Satelliten- und Empfängeruhrfehler  $\delta t^j$  bzw.  $\delta t_{RS}$  und dem hier in verkürzter Schreibweise dargestellten Vektor des Orbitfehlers  $\delta \mathbf{o}_{RS}^j$  ausgegangen. Die weiteren Fehlereinflüsse werden der Übersichtlichkeit wegen zunächst vernachlässigt.

Die Pseudostreckenkorrektur  $PRC(t_k)$  ist gleich der Differenz zwischen der aus den bekannten Koordinaten der Referenzstation  $\mathbf{X}_{RS}$  und des Satelliten  $\mathbf{X}^j$  berechneten geometrischen Strecke  $|\mathbf{R}_{RS}^j(t_k)|$  und der beobachteten Pseudoentfernung  $PR_{RS}^j(t_k)$  zur Referenzepoche  $t_k$ :

$$PRC_{RS}^j(t_k) = |\mathbf{R}_{RS}^j(t_k)| - PR_{RS}^j(t_k) \quad (3.10)$$

$$= -c(\delta t_{RS} - \delta t^j) - \delta \mathbf{o}_{RS}^j - \dots \quad (3.11)$$

mit der Pseudostrecke  $PR_{RS}^j$  als korrigierte Beobachtung der rohen gemessenen Pseudoentfernung  $PR_{RS_{gem}}^j$ , verbessert um den Empfängeruhrfehler  $\delta t_{RS}$ , die L1–L2 Gruppenlaufzeitverzögerung  $T_{gd}$ , den Satellitenuhrsynchrisationsfehler  $\delta t^i$  und die relativistische Korrektur  $\delta t^{rel}$  (RTCM 2001):

$$PR_{RS}^j = PR_{RS_{gem}}^j + \delta t_{RS} + T_{gd} + \delta t^j + \delta t^{rel} \quad (3.12)$$

Nach dem RTCM-Standard dürfen bei der Berechnung der Differentialkorrekturen auf einer Referenzstation weder ionosphärische noch troposphärische Laufzeitverzögerungen korrigiert werden. Korrekturen wegen Mehrwegeausbreitung sind dagegen zulässig.

Zusätzlich zur Pseudostreckenkorrektur wird die Änderung der Pseudostreckenkorrektur (Range Rate Correction (RRC)) auf der Referenzstation bestimmt:

$$RRC_{RS}^j(t_k) = \frac{\partial PRC_{RS}^j}{\partial t_k} \quad (3.13)$$

Die Pseudostreckenkorrektur  $PRC$  und deren Änderungsrate  $RRC$  beziehen sich auf die Referenzepoche  $t_k$ . Sie werden, von einer kleinen durch die Datenübertragung verursachten Zeitverzögerung abgesehen, in Echtzeit zum Rover ( $Rov$ ) übertragen. Dort müssen die Korrekturen für die tatsächliche Beobachtungsepoche  $t$  präzisiert werden:

$$PRC_{Rov}^j(t) = PRC_{RS}^j(t_k) + RRC_{RS}^j(t - t_k) \quad (3.14)$$

Die Positionsberechnungen auf der Nutzerseite müssen sich auf den gleichen Navigationsdatensatz (Orbit- und Satellitenuhrparameter) beziehen wie die Pseudostreckenberechnungen auf der Referenzstation. Um dies sicherzustellen, wird der in den GPS-Navigationsdaten enthaltene Zeitstempel IOD (Issue of Data) auch mit den RTCM-Nachrichten übertragen.

Entscheidend für die erreichbare Positionierungsgenauigkeit ist der letzte Term in (3.14). Je kleiner die Änderungen der Streckenkorrektur und je geringer die als Datenalter bezeichnete Zeitdifferenz  $\Delta t = t - t_k$ , desto mehr nähert sich das Ergebnis der differentiellen Positionsbestimmung einer im Post-processing ausgewerteten Empfänger-Einfachdifferenz  $\Delta PR_{RS,Rov}^j$  an.

Entsprechend (3.9) gilt für die vom Rover gemessene Pseudostrecke zur Epoche  $t$ :

$$PR_{Rov}^j(t) = |\mathbf{R}_{Rov}^j(t)| + c(\delta t_{Rov} - \delta t^j) + \delta \mathbf{o}_{Rov}^j + \dots \quad (3.15)$$

Durch Addition der präzisierten Pseudostreckenkorrektur  $PRC_{RS}^j(t)$  zu der gemessenen Pseudostrecke  $PR_{Rov}^j(t)$  folgt die verbesserte Pseudostrecke:

$$PR_{Rov}^j(t)_{cor} = PR_{Rov}^j(t) + PRC_{Rov}^j(t) \quad (3.16)$$

Setzt man die Pseudostrecke (3.15) und die Pseudostreckenkorrektur aus (3.11) in (3.16) ein,

$$PR_{Rov}^j(t)_{cor} = |\mathbf{R}_{Rov}^j(t)| + c(\delta t_{Rov} - \delta t^j) - c(\delta t_{RS} - \delta t^j) + \delta \mathbf{o}_{Rov}^j(t) - \delta \mathbf{o}_{RS}^j(t) + \dots \quad (3.17)$$

und berücksichtigt, dass sich der auf den Rover wirkende Bahnfehler

$$\delta\mathbf{o}_{Rov} = \delta\mathbf{o}_{RS} + \delta\mathbf{o}_{\Delta},$$

nur um einen differentiellen Anteil  $\delta\mathbf{o}_{\Delta}$  vom Bahnfehler der Referenzstation unterscheidet, erhält man die Beobachtungsgleichung der differentiell korrigierten Pseudostreckenbeobachtung:

$$PR_{Rov}^j(t)_{cor} = |\mathbf{R}_{Rov}^j(t)| - c\delta t_{RS-Rov}(t) - \delta\mathbf{o}_{RS\Delta}^j(t) + \dots \quad (3.18)$$

Darin ist  $\delta t_{RS-Rov}(t) = \delta t_{RS}(t) - \delta t_{Rov}(t)$  die Differenz der Empfängeruhrfehler. Der Empfängeruhrfehler der Referenzstation beeinflusst alle Pseudostreckenkorrekturen in gleicher Weise, so dass die Positionsberechnung solange nicht beeinträchtigt wird, wie der Rover seine Lösungen ausschließlich mit differentiell korrigierten Pseudostrecken berechnet. Eine gemeinsame Verarbeitung mit unkorrigierten Pseudostrecken, z.B. weil aufgrund von Sichteinschränkungen Referenzstation und Nutzer unterschiedliche Satelliten beobachten, führt zu einer Verschlechterung der Positionslösung auf das Niveau einer Einzelpunktbestimmung. Der Satellitenuhrfehler wird aus den Differenzen der kombinierten Uhrfehler eliminiert. Ebenso wird der radiale Bahnfehler weitestgehend reduziert, weil er, abhängig von der Basislinienlänge, hochgradig positiv korreliert ist. Dies gilt auch für andere räumlich und zeitlich positiv korrelierte Fehler wie die troposphärische und die ionosphärische Laufzeitverzögerung. Die Wirkung ausschließlich stationsabhängiger Fehler (Mehrwegeausbreitung, Messrauschen) wird dagegen dem Fehlerfortpflanzungsgesetz folgend in der Differenz noch verstärkt. Sie begrenzen damit die erreichbare DGPS-Genauigkeit.

Aus Gleichung (3.18) ist unmittelbar ersichtlich, warum Selective Availability (SA) als Systemsicherungsmaßnahme durch differentielle Beobachtungstechniken umgangen werden kann. Mit der Elimination des Satellitenuhrfehlers bleibt der auf die Satellitenuhr wirkende  $\delta$ -(dither)-Prozess ebenso wirkungslos wie der – allerdings nie aktivierte –  $\varepsilon$ -Prozess, der die Genauigkeit der Satellitenbahninformationen reduzieren sollte. Die hohe Dynamik des  $\delta$ -Prozesses erfordert jedoch eine hohe Aufdatierungsrate der Pseudostreckenkorrektur (3.14) und möglichst geringe Zeitverzögerungen im Bereich weniger Sekunden bei der Datenübertragung.

Die Wirkung des  $\delta$ -(dither)-Prozesses spiegelt sich in den Pseudostreckenkorrekturen mit Maximalwerten um  $\pm 60$  m in Abb. 3.9 wider. Nach Deaktivierung von SA entfällt der künstliche systematische Fehlereinfluss und die Pseudostreckenkorrekturen variieren um  $\pm 3$  m.

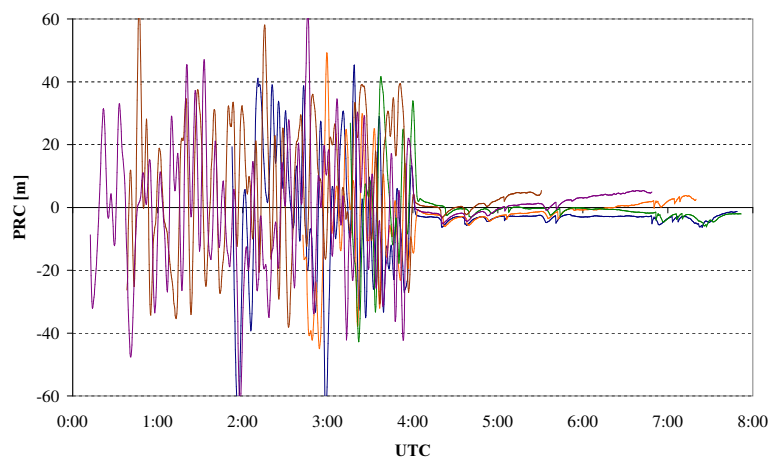


Abbildung 3.9: Pseudostreckenkorrekturen der Referenzstation 0640 vor und nach Deaktivierung von SA am 2. Mai 2000 um 4:00 UTC

Werden die Pseudostreckenkorrekturen den Standardalgorithmen des RTCM SC-104 Dokumentes folgend berechnet, sollten sie von der Auswertesoftware jedes Rovers problemlos verwendbar sein. Die

Unabhängigkeit der Hard- und Software der Referenz- und Roverstation zählt zu den Vorteilen des DGPS-Verfahrens. Zu den weiteren Vorteilen der Beobachtungskorrekturen gehört, dass die auf der Referenzstation und dem Rover beobachteten Satelliten nicht alle identisch sein müssen. Weiterhin wird für das Verfahren lediglich eine Referenzstation mit ausreichend genauen Referenzkoordinaten benötigt. Die Wirksamkeit der Korrekturen sinkt jedoch mit wachsendem Abstand von der Referenzstation sowie mit wachsendem Datenalter, so dass der Arbeitsbereich einer Referenzstation räumlich begrenzt ist.

### 3.3.4 Korrekturen im Zustandsraum

In Positions- und Beobachtungskorrekturen sind die verschiedenen Fehlereinflüsse der GPS-Positionierung zu einem skalaren Korrekturwert zusammengefasst. Die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Fehler in Bezug auf ihre zeitliche und räumliche Korrelation bleiben dabei unberücksichtigt. Die Berechnung individueller Fehleranteile u.a. für die Satellitenbahn, für die Satellitenuhren und für die Ionosphäre eröffnet aber die Möglichkeit, einerseits den Arbeitsbereich von Referenzstationen zu erweitern, andererseits die Häufigkeit der Ausstrahlung der Korrekturen und damit die zu übertragende Datenmenge zu reduzieren.

Für Codemessungen setzt sich der Vektor der Korrekturterme, auch als Zustandsvektor bezeichnet, für jeden Satelliten aus jeweils drei Parametern für die Bahnkorrektur und die Satellitenuhr zusammen sowie einem Parameter für die ionosphärische Laufzeitverzögerung. Es kann noch ein Parameter für die Troposphäre hinzukommen. Die richtige Trennung der ionosphärischen Laufzeitfehler von den Satellitenbahnfehlern setzt die Ausrüstung der Referenzstationen mit Zweifrequenzempfängern voraus.

Um vektorielle Zustandskorrekturen zu generieren, werden mehrere möglichst weiträumig verteilte Referenzstationen benötigt. Diese Referenzstationen müssen miteinander vernetzt werden. Dabei kann es sich im einfachsten Fall um ein erweitertes Netz lokaler DGPS-Stationen (Brown 1989) handeln oder in der komplexen Form um Wide Area Augmentation Systems (WAAS), weitmaschigen Netzen von kontinentaler Ausdehnung (Kee 1996). Die globalen Parameter der Satellitenuhren und -bahnen lassen sich nur in einem globalen Netz richtig schätzen. Globale Ionosphärenmodelle erweisen sich dagegen als zu ungenau, sie müssen durch regionale Modelle gestützt werden.

Das bekannteste Netz bilden die Bodenstationen des GPS-Kontrollsegmentes, aus deren Beobachtungen Zustandskorrekturen in Form der Broadcast Ephemeriden berechnet und gemeinsam mit den GPS-Messsignalen ausgestrahlt werden. Mit den Korrekturtermen der Broadcast Ephemeriden können jedoch keine DGPS-Genauigkeiten erzielt werden, da sie zu selten aufdatiert werden, viel zu wenig Bodenstationen existieren und das globale ionosphärische Modell zu ungenau ist. Diese Nachteile können mit unabhängigen, von staatlichen oder privaten Organisationen betriebenen Referenznetzen behoben werden. Beispiele für einen öffentlichen SPP-Dienst ist GPS\*C von Geomatics Canada. Auch alle Wide Area Systeme (WAAS, OmniSTAR) basieren auf Zustandskorrekturen.

Das in DGPS-Netzen praktizierte Verfahren der Zustandsraumkorrekturen konnte bislang noch nicht auf trägerphasenbasierte PDGPS-Netze übertragen werden, da hier wegen dem Zwang zur Mehrdeutigkeitslösung wesentlich höhere Anforderungen an die Zustandsschätzung gestellt und ausreichend weiträumige PDGPS-Referenznetze erst seit wenigen Jahren aufgebaut werden. Für die kleineren Netze war die Entwicklung von speziellen Vernetzungslösungen (Kap. 4) notwendig. Auf die Bedingungen für ein Zustandsraummodell auch für PDGPS-Netze wird in Kap. 6 eingegangen.

## 3.4 Trägerphasenkorrekturen

Die Methoden der differentiellen Echtzeitpositionierung ermöglichen mit einer Referenzstation Genauigkeiten vom Meter- bis in den Submeter-Bereich. Genauere Lösungen erfordern präzise differentielle

Positionierungsverfahren auf der Basis von Trägerphasenmessungen. Dazu müssen die gesamten, umfangreichen Code- und Trägerphasendaten einer Referenzstation über ein geeignetes Kommunikationsmedium zu einem Nutzer übertragen werden. Alternativ lässt sich durch die Verwendung von Trägerphasenkorrekturen die zu übertragende Datenmenge reduzieren. Für beide Vorgehensweisen sind wiederum im RTCM SC-104 Standard Formate definiert. Das erste Verfahren wird im allgemeinen als Rohdatenübertragung mit den RTCM-Nachrichtentypen 18/19 bezeichnet, die als zweites beschriebene Korrekturdatenübertragung erfolgt mit den RTCM-Nachrichtentypen 20/21. Während die Algorithmen zur Berechnung von Trägerphasenkorrekturen in den beiden nachfolgenden Abschnitten hergeleitet werden, folgt der Vergleich beider Verfahren im Zusammenhang mit der Beschreibung des RTCM-Korrekturdatenformats in Kap. 3.5.

Die Berechnung von Trägerphasenkorrekturen auf einer Referenzstation (Kap. 3.4.1) ist zu unterscheiden von deren Verwendung durch einen Nutzer (Kap. 3.4.2) und wird deshalb in zwei getrennten Abschnitten beschrieben. Die Herleitungen basieren im wesentlichen auf dem RTCM (2001)-Dokument sowie auf Veröffentlichungen von Blumenhofer, Hein (1993), Blumenhofer (1997) und Leick (1995).

### 3.4.1 Berechnung von Trägerphasenkorrekturen auf einer Referenzstation

Zur Berechnung von Trägerphasenkorrekturen muss der Mehrdeutigkeitsterm  $N$ , eine ganzzahlige Unbekannte in der GPS-Beobachtungsgleichung (2.9), abgeschätzt werden. Mit Hilfe der Codemessung  $PR_{RS}^j$  zu einer Anfangsepoche  $t_0$  wird unter Vernachlässigung der systematischen Fehler ein Überschlagswert für den ganzzahligen Mehrdeutigkeitsterm  $N$  bestimmt:

$$N_{RS}^j(t_0) \approx \frac{PR_{RS}^j(t_0) - \Phi_{RS}^j(t_0)}{\lambda} \quad (3.19)$$

Anstelle der tatsächlichen Codemessung  $PR_{RS}^j$  kann auch die gerechnete geometrische Entfernung  $|\mathbf{R}_{RS}^j(t_0)|$  eingesetzt werden.

Addiert zur Trägerphasenbeobachtung  $\Phi_{RS}^j(t_0)$  wird über den Näherungswert eine aus Trägerphasenmessungen abgeleitete „gemessene“ Pseudostrecke  $PR_{\Phi_{RS}}^j$  berechnet.

$$PR_{\Phi_{RS}}^j(t_0) = \Phi_{RS}^j(t_0) + \lambda N_{RS}^j(t_0) \quad (3.20)$$

Die Differenz zwischen der aus bekannten Koordinaten gerechneten Entfernung und der gemessenen Entfernung nach 3.20 beträgt:

$$\Delta R^j(t_0) = \frac{|\mathbf{R}_{RS}^j(t_0)|}{\lambda} - PR_{\Phi_{RS}}^j(t_0) \quad (3.21)$$

Die Differenzen für alle  $S$  empfangenen Satelliten werden gemittelt,

$$\Delta \bar{R}^S(t_0) = \sum_{j=1}^S \frac{1}{n} \Delta R^j(t_0) \quad (3.22)$$

woraus der Bias der Empfängeruhr folgt:

$$\delta t_{RS}^S(t_0) = \frac{\Delta \bar{R}}{c_0} \quad (3.23)$$

Um diesen Empfängeruhrfehler wird die Trägerphasenkorrektur für jeden Satelliten vermindert.

$$\Delta \Phi_{RS}^j(t_0) = \Delta R^j(t_0) - \Delta \bar{R}^S(t_0) \quad (3.24)$$

Der Mittelwert aller Korrekturen ist zur Epoche  $t_0 = 0$ .



Für die darauffolgenden Epochen werden alle ohne Unterbrechung beobachteten Satelliten einbezogen, um die Änderungsrate der Entfernungsdifferenz  $\delta R$  zu berechnen:

$$\delta R^S = \frac{|\mathbf{R}_{RS}^S(t_k)| - |\mathbf{R}_{RS}^S(t_{k-1})|}{\lambda} - (PR_{\Phi_{RS}}^S(t_k) - PR_{\Phi_{RS}}^S(t_{k-1})) \quad (3.25)$$

Daraus folgt mit der Änderungsrate des Bias der Empfängeruhr

$$\delta t_R^S(t_k) = \delta t_{RS}^S(t_{k-1}) + \sum \frac{1}{n} \delta R^S \quad (3.26)$$

die Trägerphasenkorrektur für eine beliebige Epoche  $t$ :

$$\Delta \Phi_{RS}^S(t) = \frac{|\mathbf{R}_{RS}^S(t)|}{\lambda} - \delta t_{RS}^S(t) \quad (3.27)$$

Solange mindestens ein Satellit kontinuierlich beobachtet wird, tritt bei Änderungen der Satellitenkonfiguration kein Sprung im Bias der Empfängeruhr auf. Allerdings unterliegt die Summe der Korrekturen einer Drift, die durch Einsatz eines Langzeitfilters verzögert wird (Blomenhofer 1997).

### 3.4.2 Verwendung von Trägerphasenkorrekturen auf einer Nutzerstation

Die auf der Referenzstation nach (3.27) berechneten Trägerphasenkorrekturen werden nach der Übertragung mit einem Kommunikationssystem vom Nutzer empfangen und zu den Trägerphasenbeobachtungen  $\Phi_{Rov}^S$  des Roverempfängers addiert:

$$\bar{\Phi}_{Rov}^S = \Phi_{Rov}^S + \Delta \Phi_{RS}^S \quad (3.28)$$

Die auf der Referenzstation generierte Trägerphasenkorrektur lautet:

$$\Delta \Phi_{RS}^S = \frac{|\mathbf{R}_{RS}^S|}{\lambda} - (\Phi_{RS}^S + N_{RS}^S(t_0)) - \delta t_{RS}^S \quad (3.29)$$

Für eine Einfachdifferenz  $\Delta$  aus rohen Trägerphasenbeobachtungen gilt allgemein:

$$\lambda (\Phi_{Rov}^S - \Phi_{RS}^S) = (|\mathbf{R}_{Rov}^S| - |\mathbf{R}_{RS}^S|) + c(\delta t_{Rov} - \delta t_{RS}) + \lambda (N_{Rov}^S - N_{RS}^S) - \Delta I + \Delta T + \epsilon_{\Delta \Phi} \quad (3.30)$$

Nun sollen aber bei der Differenzbildung nicht die rohe Trägerphasenbeobachtungen, sondern lediglich die Trägerphasenkorrekturen angebracht werden. Auf der linken Seite muss also stehen:

$$\lambda (\Phi_{Rov}^S + \Delta \Phi_{RS}^S) = \quad (3.31)$$

Um das zu erreichen, wird (3.29) mit dem Term  $\lambda$  multipliziert. Durch Umstellen von (3.29) folgt:

$$\lambda (\Phi_{RS}^S + \Delta \Phi_{RS}^S) = |\mathbf{R}_{RS}^S| - \lambda N_{RS}^S(t_0) - \lambda \delta t_{RS}^S \quad (3.32)$$

Gleichung 3.30 mit 3.32 addiert ergibt:

$$\lambda (\Phi_{Rov}^S + \Delta \Phi_{RS}^S) = |\mathbf{R}_{Rov}^S| + ((c(\delta t_{Rov} - \delta t_{RS}) - \lambda \delta t_{RS}^S) + \lambda (N_{Rov}^S - N_{RS}^S - N_{RS}^S(t_0))) - \Delta I + \Delta T + \epsilon_{\Delta \Phi} \quad (3.33)$$

Die gerechnete Entfernung  $|\mathbf{R}_{RS}^S|$  ist eliminiert worden, d.h. für die Berechnung der korrigierten Trägerphase auf der Nutzerstation ist die Kenntnis der Referenzstationskoordinaten nicht erforderlich. Lediglich zur Berechnung der atmosphärischen Korrekturen wird eine Näherungsposition der Referenzstation benötigt. Über die Anfangsmehrdeutigkeit auf der Referenzstation fließt nur die Differenz der Mehrdeutigkeiten zwischen Referenzstation und Rover in die Berechnungen ein.

## 3.5 Korrekturdatenformate

### 3.5.1 Einführung des RTCM SC-104 Standards

Sind die von einer Referenzstation ausgestrahlten Korrekturdaten weitestgehend unabhängig von Hard- und Software verwendbar, können sie von einem großen Anwenderkreis zur differentiellen GPS-Positionierung genutzt werden. Um die in den Kapiteln Kap. 3.3 und Kap. 3.4 beschriebenen Korrekturdaten möglichst vielen Nutzern zugänglich zu machen, muss deren Berechnung und das Format zur Datenübertragung standardisiert und veröffentlicht werden. Referenzstationsbetreiber wie beispielsweise die U.S. Coast Guard haben zur Verbesserung der Navigation in den küstennahen Gewässern frühzeitig eine solche Standardisierung angestrebt, die von einem Ausschuss für differentielle GPS Dienste (Special Committee SC-104) der Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) realisiert wurde. Da sich alle Hersteller und Anwender an diesem RTCM SC-104 Standard orientieren, hat er über den marinen Bereich hinaus eine weltweite Verbreitung gefunden und sich auch im Vermessungswesen durchgesetzt. Für den Bereich der Luftfahrt wurde ein vergleichbarer Standard von der Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA) entwickelt.

Bei der Radio Technical Commission for Maritime Services handelt es sich um eine 1947 gegründete, beratend tätige, nicht gewinnorientierte Organisation, die sich mit technischen und institutionellen Fragen zum marinen Funkwesen befasst. Sie erhielt 1983 durch das U.S. Institute of Navigation den Auftrag zur Erarbeitung von Empfehlungen zur Übertragung differentieller Korrekturen für GPS-Nutzer (Langley 1994), die in drei Arbeitsgruppen (Datenformat und Nachrichtenstruktur; Kommunikationsverbindungen; Pseudolite Design) des Ausschusses für differentielle GPS-Dienste (Special Committee SC-104) bearbeitet wurden. Dem Tätigkeitsschwerpunkt dieser Institution entsprechend wurde das Format ausschließlich für die unidirektionale Ausstrahlung (Broadcast) von zunächst nur Codekorrekturen einer einzelnen Referenzstation entwickelt.

Die ersten, als vorläufig bezeichneten Empfehlungen wurden 1985 als RTCM SC-104 Version 1.0 veröffentlicht. Die Akzeptanz durch Hard- und Softwarehersteller führte unter Berücksichtigung der zwischenzeitlich gewonnenen Erfahrungen zu einer aktualisierten, nun als verbindlich bezeichneten Version 2.0 im Jahre 1990, die zusätzlich zu den Korrekturen u.a. um Statusinformationen zur Satellitenkonstellation und zur Datenübertragungseinrichtung ergänzt wurde (Heimberg 1994). Der RTCM-Standard wurde bis 2004 dreimal revidiert. Um die Kompatibilität zu den vorhergehenden Versionen zu wahren, wurde die grundsätzliche Nachrichtenstruktur trotz einiger Nachteile hinsichtlich der Effizienz der Datenübertragung nicht geändert. Im Frühjahr 2004 wurde eine aufgrund der technischen und konzeptionellen Weiterentwicklungen unumgänglich gewordene neu entwickelte Version 3 freigegeben, die im Kap. 3.5.6 erläutert wird. Weil die Version 2 ihre Bedeutung auf absehbare Zeit nicht verlieren und parallel zur Version 3 weiter eingesetzt wird, beziehen sich die nächsten drei Abschnitte im wesentlichen auf die Version 2.

Im November 2004 wurde ein neuer Standard zur Ausstrahlung von GNSS-Korrekturdaten über das Internet in der Version 1.0 veröffentlicht (RTCM 2004a). Mit dem als „Networked Transport of RTCM via Internet Protocol“ (Ntrip) bezeichneten Standard können neben Rohdaten der Referenzstationen, Differentialkorrekturen und Vernetzungsparameter auch zusätzliche Daten an nahezu beliebig viele stationäre und mobile Nutzer übertragen werden. Die Entwicklung von Ntrip wurde vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie initiiert. Sie basiert auf der Technologie der Internet-Radios und steht in Konkurrenz zum terrestrischen Datenfunk. Das Protokoll und die zur Echtzeitdatenübertragung per Internet notwendigen Komponenten werden in Kap. 5.2.5 beschrieben.

### 3.5.2 Entwicklungen für RTK- und GNSS-Anwendungen

Anfang der neunziger Jahre wurde das DGPS-Prinzip durch Hinzunahme von Trägerphasenbeobachtungen zur präzisen differentiellen Echtzeitpositionierung (PDGPS) weiterentwickelt. Die als RTK-System bezeichnete Hardware besteht aus zwei GPS-Ausrüstungen mit zwei Funkeinrichtungen und einer in Bezug auf Mehrdeutigkeitslösungen verbesserten Auswertesoftware. Für die Korrekturdatenübertragung mussten die Hersteller ein eigenes Korrekturdatenformat (z.B. Trimble Compact Measurement Record (CMR), Talbot (1996)) definieren, um die im RTCM SC-104 Standard nicht vorgesehenen Trägerphaseninformationen mit den deutlich größeren Datenmengen übertragen zu können. CMR ist durch Kompression der rohen Korrekturdaten (entsprechend den RTCM-Typen 18/19) sehr kompakt. Zur sekundlichen Übertragung von Trägerphasenkorrekturdaten reichen 2400 Bits pro Sekunde (bps) aus, dies ermöglicht geringe Latenzzeiten.

Die Entwicklung der RTK-Anwendungen aufgreifend wurde 1994 die RTCM SC-104 Version 2.1 veröffentlicht, die erstmals Korrekturdatenformate für Trägerphasenrohdaten und eine vorläufige Definition für Trägerphasenkorrekturen berücksichtigte. Mit dem - nur vorübergehenden - Ausbau des russischen Satellitennavigationssystems GLONASS und der Verfügbarkeit von GLONASS- und kombinierten GPS-GLONASS-Empfängern musste der RTCM-Standard für GLONASS erweitert werden. Die mit den differentiellen Trägerphasenbeobachtungen erreichbaren hohen Genauigkeiten machten außerdem eine Präzisierung einiger Datenformate bezüglich genauerer Zeitinformationen und Antennenphasenzentrumskoordinaten notwendig. Bereits 1996 detailliert von Kalafus (1996) beschrieben, wurde die Version 2.2 aber erst 1998 veröffentlicht. Mit der derzeit aktuellen Version 2.3 von 2001 folgte eine weitere Verfeinerung z.B. der Stationskoordinaten und weiterer Definitionen für RTK-Anwendungen.

Die Entwicklung des RTCM SC-104 Standards, in Tab. 3.1 zusammenfassend dargestellt, ist mit der Version 2 bereits vor Jahren an ihre Grenze gestoßen. Der Standard ist ausreichend, um von einer einzelnen Referenzstation Korrekturdaten für PDGPS-Anwendungen in einem räumlich begrenzten Arbeitsgebiet von weniger als 10 km auszusenden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Differentialkorrekturen die Unterschiede der ionosphärischen und troposphärischen Laufzeitverzögerungen zwischen Referenzstation und Rover hinreichend beschreiben und Restfehler vernachlässigbar sind. Dies trifft für größere Stationsabstände nicht mehr zu, die verbleibenden Fehler müssen in Multistationslösungen aus mehreren Referenzstationen, die Gegenstand von Kap. 4 sind, modelliert werden. Zur Übertragung solcher Netzkorrekturen sieht die Version 2.3 jedoch keinen Nachrichtentyp vor. Nachteilig ist weiterhin, dass die Version 2 durch eine ungünstige Datenstruktur und redundante Informationen viel Platz benötigt und dadurch die Nutzung von Kommunikationssystemen mit geringer Bandbreitenkapazität erschwert ist. Außerdem sind Revisionen des Standards sehr langwierig, weshalb aktuelle PDGPS-Entwicklungen nur mit einiger Zeitverzögerung nachvollzogen werden können. Zur Überwindung der verschiedenen Einschränkungen wurde ein neuentwickelter RTCM SC-104 Standard als Version 3 am 10. Februar 2004 veröffentlicht, der in Kap. 3.5.6 näher beschrieben wird.

### 3.5.3 Aufbau des RTCM SC-104 Korrekturdatenformates

Der RTCM SC-104 Standard wurde im Hinblick auf die Aussendung der Korrekturdaten per Funk im sogenannten Broadcast-Verfahren entwickelt. Die RTCM-Datensätze setzen sich aus unterschiedlichen Nachrichtentypen (message types oder frames) zusammen (Abb. 3.10), deren Struktur den Nachrichten der im (ICD-GPS-200C 2000) dokumentierten GPS-Navigationsdaten entspricht. Jede Nachricht beginnt mit einem Kopf (header), bestehend aus zwei Wörtern mit einer Länge von je 30 Bit. Darin werden der Nachrichtentyp (frame ID), die Identifikation der Referenzstation, die Referenzzeit (modified Z-count), die Länge der Nachricht und die Qualität der Referenzstation in Form eines Skalierungsfaktors für den UDRE (User Differential Range Error)-Parameter übertragen. Im Rumpf (body) der Nachricht folgen dann für jeden Nachrichtentyp eine unterschiedliche Anzahl an Wörtern; maximal 31 Wörter sind er-

Tabelle 3.1: Versionen des RTCM-Standards

RTCM-Version	veröffentlicht	Neuerungen
RTCM 1.0	1985	Vorläufige Empfehlungen für DGPS: – Pseudostrecken- u. RRC-Korrekturen
RTCM 2.0	1990	DGPS-Korrekturdaten und Zusatzinformationen: Nachrichtentypen 1–17,59 – Positionierungsgenauigkeit 1..3 m (< 5 m in 95%) – Datenübertragungsrate > 50 bps – Aufdatierungsrate < 10 sec aktuelle Statusinformationen (Satellitenkonst., Datenübertragung)
RTCM 2.1	1994	Erweiterung für PDGPS (RTK): Trägerphasenrohdaten (18/19), Trägerphasenkorrekturen (20/21) (vorl.) – Positionierungsgen. ~cm (Entfernungsabhängigkeit mind. 1 ppm) – Datenübertragungsrate > 4800 bps – Aufdatierungsrate $\ll$ 10 sec
RTCM 2.2	1998	Erweiterung für (P)DGLONASS (Typen 31-37): – Differentialkorrekturen der GLONASS-Beobachtungen – Aufdatierungsrate GLONASS ca. 30 sec Trägerphasenkorrekturen (20/21) (fest definiert) Verfeinerung der Zeit- und Koordinatendefinition (Typen 4, 14, 22)
RTCM 2.3	2001	Zusätzliche Nachrichten für RTK-Anwendungen (Typ 23, 24): – zur Definition des Referenzstationszentrums – Verbesserung der Auflösung und Definition von Stationskoordinaten – Berücksichtigung von Antennenkalibrierungen
RTCM 3.0	2004	Neue Anleitungen zur Unterstützung von GLONASS-Operationen Neuentwicklung zur Unterstützung verschiedener RTK-Anwendungen: – Datenbankorientiertes Format – 24-Bit-Prüfschema

laubt. Jedes 30-Bit-Wort enthält 24 Datenbits und sechs Prüfbits (parity check), die nach dem gleichen Hamming Code Paritätsalgorithmus wie die GPS-Nachrichtendaten auf Übertragungsfehler geprüft werden.

Von 64 möglichen Nachrichtentypen sind 33 als endgültig (fixed), vorläufig (tentative) oder reserviert (reserved) für zukünftige Anwendungen definiert. Eine Liste der Nachrichtentypen gibt Tab. 3.2 wieder. Die Nachrichtentypen 1–17 sind in Verbindung mit der RTCM-Version 2.0 vereinbart worden. Mit der Version 2.1 sind die Typen 18–24 hinzugekommen. Für die Erweiterung um GLONASS wurden in der Version 2.2 die Typen 31–37 definiert. In den beiden nachfolgenden Abschnitten werden zunächst die Formate für DGPS-Anwendungen (Kap. 3.5.4) und anschließend die wesentlichen Formate für PDGPS-Anwendungen (Kap. 3.5.5) angesprochen.

### 3.5.4 RTCM-Formate für DGPS-Anwendungen

Die 1990 herausgegebene Version 2.0 des RTCM-Formates bildet die operationelle Grundlage für DGPS-Anwendungen. Mit den Nachrichtentypen 1–16 (vgl. Tab. 3.2) können alle für die differentielle Positionierung notwendigen Korrekturdaten übertragen werden. Die Auflösung der Korrekturinformationen wurde auf die Genauigkeit der Code-Beobachtungen abgestimmt, so dass eine DGPS-Genauigkeit von ca. 1 m erreichbar ist.

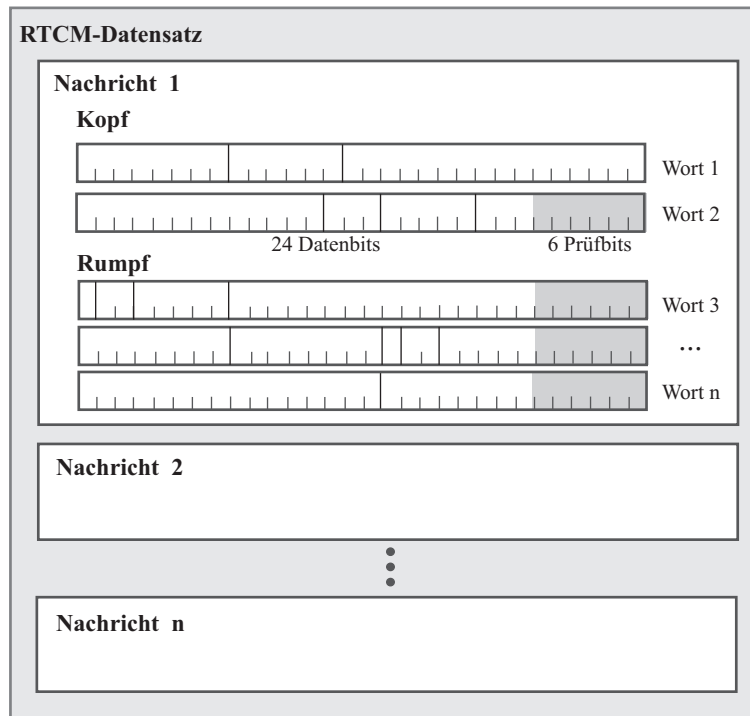


Abbildung 3.10: Struktur der RTCM SC-104 Version 2 Datensätze

Die zu übertragende Datenmenge wird von der Anzahl der beobachteten Satelliten und der Anzahl und Art der Nachrichtentypen bestimmt. Die Übertragungsrate, die mindestens zu gewährleisten ist, hängt außerdem ab von (RTCM 2001):

- Variationen der Satellitenuhr (Dither) bei aktivierter SA
- zeitlichen Variationen der Ionosphäre
- Zuverlässigkeit des Datenübertragungskanals
- Zeit zur Akquirierung des DGPS-Dienstes

Zur Aussendung aller Korrekturdaten in den 16 Nachrichtentypen für die maximal sichtbaren 12 GPS-Satelliten wird eine Übertragungsrate von 1200 bps benötigt. Die Pseudostreckenkorrekturen (Typ 1) werden sekundlich übertragen, alle weiteren Nachrichten in größeren Zeitabständen. So müssen die Delta-Korrekturen (Typ 2) nur mit jedem Ephemeridenwechsel ausgesendet werden. Die Referenzstationskoordinaten (Typ 3) und die frei wählbare alphanumerische Nachricht (Typ 16) können in beliebigen Zeitintervallen von bspw. 1–10 Minuten übertragen werden (Bagge 2001).

### 3.5.5 RTCM-Formate für PDGPS-Anwendungen

#### 3.5.5.1 Trägerphasenrohdaten und -korrekturdaten

Der RTCM-Standard in der Version 2.0 definierte nur Korrekturen für Code-Beobachtungen. Die auf Trägerphasenbeobachtungen basierenden RTK-Anwendungen machten eine Erweiterung des RTCM SC-104 Standards notwendig, die 1994 verabschiedet wurde. Die wesentliche Neuerung der Version 2.1 war die Einführung vier neuer Nachrichtentypen für RTK-Anwendungen. In diesem Abschnitt werden zunächst die neuen Nachrichtentypen diskutiert, die zwei grundsätzlich verschiedene Vorgehensweisen für die präzise DGPS-Positionierung ermöglichen. Anschließend werden anhand der Auflösung der Referenzstationskoordinaten, der Antennendefinition sowie der Datumsproblematik die durch den RTCM-Standard bedingten Genauigkeitsgrenzen der PDGPS-Positionierung aufgezeigt.

Tabelle 3.2: Nachrichtentypen des RTCM SC-104 Standards, Version 2.3

Message Type No.	Current Status	Title
1	Fixed	Differential GPS Corrections
2	Fixed	Delta Differential GPS Corrections
3	Fixed	GPS Reference Station Parameters
4	Tentative	Reference Station Datum
5	Fixed	GPS Constellation Health
6	Fixed	GPS Null Frame
7	Fixed	DGPS Radiobeacon Almanac
8	Tentative	Pseudolite Almanac
9	Fixed	GPS Partial Correction Set
10	Reserved	P-Code Differential Corrections
11	Reserved	C/A-Code L1, L2 Delta Corrections
12	Reserved	Pseudolite Station Parameters
13	Tentative	Ground Transmitter Parameters
14	Fixed	GPS Time of Week
15	Fixed	Ionospheric delay Message
16	Fixed	GPS Special Message
17	Fixed	GPS Ephemerides
18	Fixed	RTK Uncorrected Carrier Phases
19	Fixed	RTK Uncorrected Pseudoranges
20	Fixed	RTK Carrier Phases Corrections
21	Fixed	RTK/Hi-Accuracy Pseudorange Corrections
22	Tentative	Extended Reference station Parameters
23	Tentative	Antenna Type Definition record
24	Tentative	Antenna Reference Point (ARP)
25–26	–	Undefined
27	Tentative	Extended Radiobeacon Almanac
28–30	–	Undefined
31	Tentative	Differential GLONASS Corrections
32	Tentative	Differential GLONASS Reference Station Parameters
33	Tentative	GLONASS Constellation Health
34	Tentative	GLONASS Partial Differential Correction Set ( $N \geq 1$ ) GLONASS Null Frame ( $N \leq 1$ )
35	Tentative	GLONASS Radiobeacon Almanac
36	Tentative	GLONASS Special Message
37	Tentative	GNSS System Time Offset
38–58	–	Undefined
59	Fixed	Proprietary Message
60–63	Reserved	Multipurpose Usage

Bei den vier neuen Nachrichtentypen handelt es sich zum einen um die unkorrigierte Trägerphasenmessung (Typ 18) und die unkorrigierte Pseudostreckenmessung (Typ 19), zum anderen um Trägerphasenkorrekturen (Typ 20) und hochgenaue Pseudostreckenkorrekturen (Typ 21). Die Pseudostreckeninformationen in den beiden Datentypen 19 und 21 liefern eine Genauigkeitsverbesserung gegenüber der Pseudostreckenkorrektur in Typ 1 und sollen die PDGPS-Lösung beschleunigen.

Mit den Nachrichtentypen 18/19 werden die gesamten rohen Beobachtungsdaten der Referenzstation zum Nutzer zur Positionsberechnung übertragen. Das Rohdatenformat wird von den GPS-Hardware- und Software-Herstellern bevorzugt, da nur wenige Änderungen an den konventionellen GPS-Auswertelgorithmen notwendig sind. Diese Vorgehensweise setzt den Einsatz gleicher Algorithmen auf der Referenzstation und dem Rover voraus, um sicherzustellen, dass die Berechnungen der Satelliten-

positionen und des Satellitenuhrfehlers zu identischen Ergebnissen führen. Algorithmusbedingte Unzulänglichkeiten werden beim Differenzieren eliminiert.

Zu den weiteren Nachteilen der Verwendung von Rohdaten gehört das große Datenvolumen, dessen Übertragung eine hohe Bandbreite erfordert. Der Nutzer benötigt exakte Referenzstationskoordinaten, da er aus den Rohdaten (18/19) die Entfernungen zwischen Referenzstation und Satellit berechnen muss, was wiederum einen höheren Rechenaufwand für den Nutzer bedeutet.

Mit den Nachrichtentypen 20/21 werden lediglich Trägerphasenkorrekturen, d.h. Differenzen zwischen der geometrischen Entfernung Empfänger–Satellit und der aus Trägerphasen abgeleiteten „gemessenen“ Pseudostrecke, übertragen. Zu den wesentlichen Vorteilen dieser Vorgehensweise gehört die Möglichkeit, unterschiedliche Software einzusetzen. Deren Algorithmen müssen jedoch dem RTCM-Standard entsprechen und Satellitenpositionen und Satellitenuhrfehler mit möglichst Submillimetergenauigkeit berechnen. Ist diese Voraussetzung erfüllt, ist der Nutzer bezüglich Software und Hardware unabhängig von der Referenzstation.

Der Vorteil des geringeren Datenvolumens kann nicht unmittelbar genutzt werden, da die Datentypen 20/21 in gleicher Weise definiert sind wie die Typen 18/19. Eine Verringerung der Bandbreite ist dennoch realisierbar, da sich die Nachrichtentypen 20/21 aufgrund redundanter bzw. nicht belegter Bits gut komprimieren lassen.

Trägerphasenkorrekturen sind weniger anfällig gegenüber Zeitverzögerungen bei der Datenübertragung. Weil die Korrekturen langsamer variieren als die Rohdaten, haben Zeitsynchronisationsfehler einen geringeren Einfluss. An die Kommunikationsverbindung werden geringere Anforderungen bezüglich Datenalter und Zuverlässigkeit der Datenübertragung gestellt (RTCM 2001). Entsprechend der Dynamik der Trägerphasenkorrekturen ist eine flexible Reduzierung der Datenrate möglich.

Für einen Nutzer bedeutet die Verwendung von Trägerphasenkorrekturen einen geringeren Rechenaufwand. Die Referenzstationskoordinaten müssen entsprechend der Herleitung in Kap. 3.4.2 nur näherungsweise bekannt sein, da sie nur zur Berechnung der Differenzen der atmosphärischen Korrekturen der Nutzerstation gegenüber denen der Referenzstation benötigt werden. Die fehlende absolute Information kann allerdings die Fehlersuche erschweren.

### 3.5.5.2 Übertragung von PDGPS-Korrekturen

Die Übertragung der Trägerphasenkorrekturen erfordert mit mindestens 4800 bps eine deutlich höhere Bandbreite des Kommunikationsmediums als DGPS-Korrekturen. Die bei RTK-Systemen üblichen UHF-Funksysteme stellen diese Bandbreite mit 9600 bps, bei neueren Funksystemen auch mehr, zur Verfügung. Der aufgrund seiner größeren Reichweite im SAPOS-Netz eingesetzte VHF-Funk im 2-m-Band ließ jedoch aufgrund der Modulationsart ursprünglich nur eine Bandbreite von 2400 bps zu. Um dennoch Trägerphasenkorrekturen übertragen zu können, werden die Datentypen 20/21 komprimiert und im proprietär nutzbaren Datentyp 59 ausgesendet. Diese als RTCM++ bezeichnete Lösung (Wübbena et al. 1996) ermöglicht die Übertragung aller notwendigen PDGPS-Informationen für die maximal 12 sichtbaren Satelliten innerhalb der verfügbaren Bandbreite. Damit kann jede Sekunde ein kompletter Datensatz übertragen werden.

Die komprimierten Korrekturdaten vom Typ 20/21 können zusätzlich verschlüsselt werden (RTCM-AdV), um eine Abrechnungsmöglichkeit für die von einem Nutzer empfangenen Daten zu haben. Zur Entschlüsselung und Dekomprimierung benötigt ein Nutzer dann einen speziellen Decoder (z.B. SAPOS-Box) oder Software-Code.

Der Nachrichtentyp 59 ist reserviert für die Übertragung proprietärer, d.h. vom RS-Betreiber selbst definierter Nachrichten zu den Nutzern. Innerhalb dieses Typs 59 können mehrere eigene Nachrichtentypen

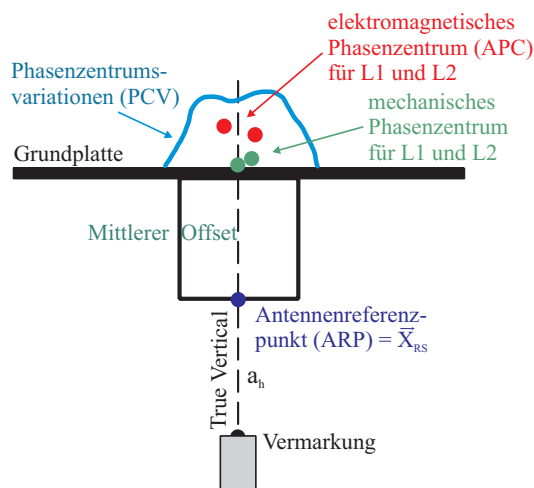


Abbildung 3.11: Bezugspunkte einer Antenne

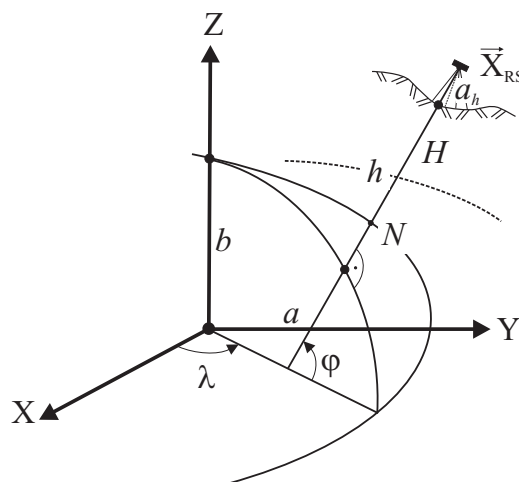


Abbildung 3.12: Zusammenhang zwischen ECEF-Referenzstationskoordinaten und Antennenbezugs-punkten

gesendet werden. Zur Identifikation für den Betreiber dienen die ersten acht Bits nach Abschluss des Headers (RTCM 2001).

### 3.5.5.3 Punktidentifikation

Durch die begrenzte Auflösung der Datenfelder setzt der RTCM SC-104 Standard Genauigkeitsgrenzen für RTK-Anwendungen. Die Genauigkeitsgrenzen ergeben sich nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz aus der Summe der Auflösung der Trägerphasenkorrekturen und der Referenzstationskoordinaten sowie der Antennendefinition. Gegebenenfalls sind noch Restfehler der Datumstransformation zu addieren.

Die Auflösung der Trägerphasenkorrekturen beträgt mit  $1/256$  Zyklen knapp unter 1 cm. Bei der mit Rohdaten erzielbaren Positionierungsgenauigkeit ist die auf 1 cm begrenzte Auflösung der Referenzstationskoordinaten (Typ 3) hinzuzurechnen. In beiden Fällen müssen zu dem theoretischen Genauigkeitspotential noch die systematischen Fehlereinflüsse addiert werden, deren entfernungsabhängige Anteile schon ab 10 km Abstand zur Referenzstation weit mehr als 1 cm betragen können.

Im RTCM-Standard beziehen sich die mit dem Typ 3 übertragenen Koordinaten auf das L1-Antennenphasenzentrum der Referenzstation, einem mechanisch nicht exakt festlegbaren Punkt der Antenne. Die ECEF (Earth Centered Earth Fixed)-Koordinaten haben eine Auflösung von nur 1 cm. Sie beziehen sich für GPS auf das WGS 84 bzw. PZ 90 für GLONASS, wenn kein anderes Datum festgelegt ist. Für genauere RTK-Anwendungen ermöglicht der später eingeführte Nachrichtentyp 22 Submillimeter-Genauigkeit, indem Korrekturen  $[\Delta X, \Delta Y, \Delta Z]_{ECEF}$  an den ECEF-Koordinaten des Typs 3 übertragen werden. Zusätzlich kann die Höhe des L1-Antennenphasenzentrums über einem vermarkten Referenzpunkt der Referenzstation übertragen werden. Aufgrund der mit den beiden Nachrichtentypen 3 und 22 verbundenen Unsicherheiten wurden diese mit der RTCM Version 2.3 durch eine explizite Definition von Antennentypen (Typ 23) und des Antennenreferenzpunktes (ARP) (Typ 24) abgelöst.

In dem Typ 23 wird der auf einer Referenzstation verwendete Antennentyp durch die Angabe einer Antennenbezeichnung, der Seriennummer und einer Setup ID spezifiziert. Damit erhält der Nutzer eine eindeutige Information darüber, welche Antenne auf der Referenzstation eingesetzt wird und ob Änderungen an der Antenne oder der Antennenaufstellung vorgenommen wurden. Die Antennenbezeichnungen entsprechen der IGS-Namenskonvention, die in der Datei [ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/station/general/rcvr\\_ant.tab](ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/station/general/rcvr_ant.tab) verfügbar sind.



Anstatt auf das elektrisch variable L1-Phasenzentrum wird mit dem Typ 24 die Referenzstationskoordinate auf einen festen mechanischen Punkt an der Antenne, den in Abb. 3.11 dargestellten Antennenreferenzpunkt (ARP), bezogen. Die RTCM-Definition ist damit konform zu den IGS-Konventionen. Die ECEF-Koordinaten des ARP werden mit einer Auflösung von  $1/10$  mm angegeben. Zusätzlich wird die vertikal gemessene Höhe ( $a_h$ ) des ARP über dem vermarkten Referenzstationszentrum übertragen (Abb. 3.12).

In den Korrekturdaten fehlen Angaben über die Lage der elektrischen L1/L2-Phasenzentren in Bezug auf den ARP. Zwar verfügen die Antennenhersteller, die Referenzstationsbetreiber sowie der IGS über entsprechende Angaben, diese unterscheiden sich jedoch erheblich in der Bestimmung der Werte. Hersteller geben überwiegend nur einen mittleren Offsetwert vom ARP zu dem L1- und L2-Phasenzentrum an, wobei diese eher der mechanischen Sollage für den Antennentyp entsprechen. Der IGS stellt Phasenzentrumskorrekturen aus Relativkalibrierungen der Antennentypen zur Verfügung (igs\_01\_antex11.pcv), während Referenznetzbetreiber teilweise über absolute Kalibrierwerte individuell für jede Referenzstationsantenne verfügen. Zur Vielfalt der Antennenkorrekturen kommt das Problem hinzu, dass nicht jede RTK-Software Antennenkorrekturen berücksichtigen kann. Im SAPOS-Netz wird diese Schwierigkeit gelöst, indem die Beobachtungen einer Referenzstation auf eine sogenannte Nullantenne (Menge 2003) reduziert werden. Dies setzt absolut kalibrierte Antennen auf den Referenzstationen voraus. Nutzer müssen nur noch Phasenzentrumskorrekturen an den Beobachtungen der eigenen Antenne anbringen. Eine solche Nullantenne wird seit 2003 in der IGS-Antennendatei als GPPNULLANTENNA geführt. Unter der Bezeichnung ADVNULLANTENNA wird sie innerhalb des SAPOS-Dienstes eingesetzt und im Typ 23 den Nutzern mitgeteilt.

Beziehen sich die Referenzstationskoordinaten entgegen der Empfehlung des RTCM SC-104 Standards auf ein anderes Datum als das WGS 84, soll diese Information im Nachrichtentyp 4 übertragen werden, was aber in der Praxis nicht befolgt wird. Die Nachricht beinhaltet die Bezeichnung des lokalen Datums sowie drei Shift-Parameter  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ , damit der Nutzer seine Lösungen korrigieren nach (3.34) kann.

$$X_{WGS\ 84} = X_{RS_{datum}} + [\Delta X, \Delta Y, \Delta Z]^T \quad (3.34)$$

Da sich viele geodätische Anwendungen auf ein lokales Datum beziehen, wie beispielsweise alle Liegenschaftsvermessungen in Niedersachsen auf das amtliche Bezugssystem LS100, ist die Übertragung der Datuminformation grundsätzlich sinnvoll. Die im Typ 4 ausgestrahlte Information ist jedoch für die geodätische Nutzung zu ungenau. Die Shift-Parameter werden nur mit Dezimetergenauigkeit übertragen und die Vernachlässigung der Rotations- und des Maßstabsparameters führt mit wachsendem Abstand zwischen Referenzstation und Nutzer zu einem Genauigkeitsverlust. Im Zusammenhang mit der Einführung der Version 3 des RTCM SC-104 Standards werden verschiedene Möglichkeiten zur Übertragung von zur präzisen Echtzeitpositionierung geeigneten Transformationsparametern und zusätzlichen Informationen über das lokale Abbildungssystem diskutiert.

### 3.5.6 RTCM-Formate für PDGPS-Netze

Ein grundlegend neu entwickelter RTCM SC-104 Standard für differentielles GNSS wurde als Version 3 im Frühjahr 2004 veröffentlicht. Der neue Standard wurde im Hinblick auf eine effektivere Datenübertragung und neue PDGPS-Anwendungen entwickelt (Kalafus, van Dierendonck 2003). Damit werden verschiedene RTK-Verfahren wie die konventionelle RTK-Positionierung und die Korrekturdatenübertragung mit geringer Bandbreite unterstützt. Allerdings sind die für eine Referenzstationsvernetzung notwendigen Formate noch nicht endgültig definiert, diese werden erst nach einer Interoperabilitätsprüfung in einer abschließenden Vereinbarung festgelegt und dann für die Version 3.0 freigegeben. Die Einbindung der neuen GPS-Signale und des GALILEO-Systems ist in der neuen Formatdefinition berücksichtigt. Dies gilt auch für die von geostationären Satelliten im gleichen Frequenzband ausgesendeten Augmentationssignale der Satellite Based Augmentation Systems (SBAS).

Die Neuentwicklung war notwendig geworden, um die Nachteile der Version 2

- für die Datenübertragung ungünstiges Verhältnis von 6 Prüfbits für 24 Datenbits
- zu geringe Integrität der Nachrichten für bestimmte Anwendungen
- keine Berücksichtigung des OSI-Schichtenmodells
- begrenzte Anzahl von 64 Nachrichten mit der Folge mehrdeutiger Datenfelder
- Berücksichtigung neuer Entwicklungen nur langwierig realisierbar

zu beseitigen. Mit einem neuen datenbankorientierten Aufbau der Datenfelder und einem neuen Prüf-schemata ist die Version 3 allerdings nicht mehr kompatibel zu den Versionen 2 des RTCM SC-104 Standards. Aufgrund der großen Verbreitung in der Praxis bleibt die Version 2.3 noch längere Zeit parallel zur Version 3 als aktueller Standard gültig. Noch nicht geklärt ist, ob die Version 2.3 zukünftig weiterentwickelt wird, z.B. hinsichtlich Netzkorrekturen.

### 3.5.6.1 Aufbau des RTCM SC-104 Version 3 Korrekturdatenformates

Dem allgemein verbreiteten OSI-Schichtmodell folgend ist die Datenübertragung von Nachrichten nach dem Version 3 Standard nun von der untersten, der hardwarenahen physikalischen Schicht über den Datenlink und die Transportschicht bis zur Präsentations- und Anwendungsschicht definiert.

Als Teil der Transportschicht besteht die grundlegende Datenstruktur aus einer Präambel, einer Definition der Länge der Nachricht und der Nachricht gefolgt von den CRC-Prüfbits (Abb. 3.13).

Präambel	Reserviert	Nachrichtenlänge	Nachricht	CRC
8 bits	6 bits	10 bits	variable Länge	24 bits
1101 0011	nicht definiert	Länge in Bytes	0-1023 bytes	Definition nach Vers. 3

Abbildung 3.13: Aufbau der Datenstruktur des RTCM SC-104 Version 3 Standards (nach Kalafus, van Dierendonck 2003)

Als Teil der Präsentationsschicht sind die Nachrichten definiert, die eine variable Länge von maximal 1023 Bytes haben können. Jede Nachricht beginnt mit einer Tabelle der nachfolgenden Datentypen. Die Reihenfolge der Felder in jeder Nachricht ist vorgegeben und deren Inhalte damit eindeutig, allerdings kann die Anzahl der nachfolgenden Felder variieren.

Mit der Version 3 werden die Nachrichten datenbankorientiert beschrieben, nach dem Muster des NMEA 2000 Standards der National Marine Electronics Association (NMEA). Auf der Grundlage existierender Nachrichtentypen soll damit die Bildung neuer Nachrichten erleichtert werden.

Mit dem neuen Version 3 Standard wird das bisherige, entsprechend den GPS-Nachrichten gebildete Paritätsschema von einem 24-Bit Cyclic Redundancy Check (CRC) abgelöst. Dieses bietet bei geringerem Overhead stärkeren Schutz sowohl gegen einzelne zufällige Bitfehler als auch gegen umfangreichere Datenstörungen. Insgesamt kann mit dem neuen Format die zu übertragende Datenmenge gegenüber der vorhergehenden Version um mehr als die Hälfte reduziert werden.

### 3.5.6.2 Nachrichten des Version 3 Standards

Der neue RTCM SC-104 Standard ist in zwei Teilen dokumentiert. In dem ersten, veröffentlichten Teil des Standards (RTCM 2004b) sind die endgültig festgelegten Formate für RTK-Anwendungen einschließlich aller weiteren dafür notwendigen Nachrichten beschrieben. Im einem zweiten, nur intern

zugänglichen Teil sind die Nachrichten definiert, die sich noch in der Entwicklung befinden und die in zukünftige Versionen des Standards aufgenommen werden sollen. Um Vollständigkeit und Interoperabilität sicherzustellen, werden die Hersteller an Weiterentwicklungen des Standards beteiligt, indem diese Beobachtungsdaten untereinander austauschen und gemeinsame Echtzeittestmessungen im Feld durchführen. Es wird erwartet, dass auf diese Weise Revisionen des Version 3 Standards innerhalb eines Jahres möglich sind.

Die in der ersten Veröffentlichung des Version 3 Standards für RTK-Anwendungen definierten Nachrichten sind in der oberen Hälfte der Tab. 3.3 aufgelistet. Im Unterschied zum Version 2 Standard wird jede RTK-Anwendung durch einen eigenen Nachrichtentyp beschrieben, um nicht eindeutige Dateninhalte auszuschließen. Für eine detailliertere Beschreibung der Nachrichtentypen siehe Kalafus, van Dierendonck (2003).

Die untere Hälfte der Tab. 3.3 gibt die in der Entwicklung befindlichen Nachrichtentypen wieder. Um möglichst viele Ansätze zur Vernetzung von Referenzstationen zu unterstützen, bevorzugt die RTCM-Arbeitsgruppe die Übertragung von Netzkorrekturen nach dem Master-Auxiliary-Konzept von Euler et al. (2001), das in Kap. 4 näher beschrieben wird. Neben den Netzkorrekturen stellen die Korrekturdatenübertragung über das Internetprotokoll und Korrekturdatenformate für GALILEO weitere Arbeitsschwerpunkte der RTCM SC-104 Arbeitsgruppen dar. Unabhängig vom jeweiligen Satellitenpositionierungssystem wird auch diskutiert, wie Parameter für Koordinatentransformationen und für verschiedene Abbildungssysteme übertragen werden können.

Tabelle 3.3: RTCM Vers. 3 Nachrichtentypen für RTK-Anwendungen

ID	Nachrichtentyp
1001	L1 GPS RTK-Beobachtungsgrößen
1002	Erweiterte GPS RTK-Beobachtungsgrößen
1003	L1/L2 GPS RTK-Beobachtungsgrößen
1004	Erweiterte L1/L2 GPS RTK-Beobachtungsgrößen
1005	Stationäre RTK-Referenzstation ARP
1006	Stationäre RTK-Referenzstation ARP mit Antennenhöhe
1007	Antennenbeschreibung
1008	Antennenbeschreibung mit Seriennummer
1009–1012	GLONASS-RTK-Beobachtungsgrößen
1013	Systemparameter
1	GNSS Netzkorrekturen
2	GPS RTK Kompakte Korrekturen
3	GPS Differentialkorrekturen
4	GLONASS Differentialkorrekturen
5	Radiobeacon Almanach
6	ASCII Zeichen
7	GPS Ephemeriden
8	Proprietäre Nachrichten

### 3.5.7 Weitere Datenformate

#### 3.5.7.1 Korrekturdatenformate für PDGPS-Anwendungen

Das wichtigste Datenformat für den Aufbau und Betrieb von Referenzstationen ist der in diesem Kapitel ausführlich beschriebene RTCM SC-104 Standard. Er gewährleistet eine reibungslose und fehlerfreie Datenkommunikation zwischen den Referenzstationen und den Nutzern. Auf der Basis des RTCM-Formates wurden weitere Formate für spezielle Echtzeitanwendungen entwickelt, die im folgenden kurz erläutert werden, soweit diese im Zusammenhang mit den Untersuchungen zur Referenzstationsvernetzung (Kap. 6) von Bedeutung sind. Für die Untersuchungen ist auch das empfängerunabhängige Austauschformat (RINEX) wichtig, in dem die GPS-Beobachtungen parallel zur Korrekturdatenausstrahlung aufgezeichnet wurden. Abschließend ist auf das NMEA-Datenformat hinzuweisen, das auf der Nutzerseite eine weit verbreitete Grundlage für die Datenkommunikation zwischen dem GPS-Empfänger bzw. der PDGPS-Auswertesoftware und weiteren Sensoren oder Softwarepaketen ist.

Mit dem Aufbau des Satellitenpositionierungsdienstes (SAPOS) in Deutschland wurden mit RTCM++, RTCM-AdV und RASANT drei Varianten des RTCM SC-104 Standards entwickelt. RASANT (Radio Aided Satellite Navigation Technique) ist ein Datenformat zur Übertragung von DGPS-Korrekturen mit einer Rate von nur 50 bps im Radio-Daten-System (RDS) von UKW-Rundfunknetzen. Es handelt sich um eine gemeinsame Entwicklung des Nordrhein-Westfälischen Landesvermessungsamtes mit dem Westdeutschen Rundfunk (WDR). Die beiden erstgenannten Formate dienen demgegenüber zur Übertragung von Trägerphasenkorrekturen und zusätzlicher Netzkorrekturen im hochpräzisen Echtzeitpositionierungsservice (HEPS) des SAPOS-Dienstes.

Um die in den Nachrichtentypen 20/21 enthaltenen Trägerphasenkorrekturen auch mit geringerer Bandbreite als die eigentlich notwendigen 9600 bps aussenden zu können, wird durch Ausnutzung der Redundanz in den beiden RTCM-Datensätzen die Datenmenge reduziert und durch Komprimierung zusätzlich verringert. Diese zum RTCM-Format nun nicht mehr konformen Daten werden im zur proprietären Nutzung vorgesehenen Typ 59 zum Nutzer übertragen, der mit Hilfe einer zusätzlichen Software oder eines Decoders die ursprünglichen Nachrichtentypen 20/21 aus dem Typ 59-Datenstrom rekonstruieren muss. Bei diesem 1993 von der Geo++ GmbH (Bagge 2001) entwickelten Verfahren können auch zusätzliche Informationen wie Netzkorrekturen ausgesendet werden. Für die präzise DGPS-Positionierung genügt bei dieser Vorgehensweise eine Bandbreite von 2400 bps, wie sie bei dem im SAPOS-Netz eingesetzten VHF-Funk im 2-m-Band zur Verfügung steht.

Um nutzungsabhängige Gebühren für die per Funk ausgestrahlten Korrekturdaten erheben zu können, wurden auf Betreiben der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder (AdV) die komprimierten Korrekturdaten (RTCM++) zusätzlich verschlüsselt (RTCM-AdV). Zur Entschlüsselung benötigt der Nutzer einen SAPOS-Decoder in Verbindung mit einer Guthaben-Chipkarte. Der entschlüsselte Datenstrom ist wieder RTCM-konform und kann, wenn auch mit Einschränkungen, von jeder RTK-Software weiterverarbeitet werden. Da sich dieses Verfahren im praktischen Einsatz nicht bewährt hat, wurden die Parameter des Nachrichtentyps 59-FKP von der AdV freigegeben und einschließlich der in Kap. 4.3.4 erläuterten Berechnungsformeln veröffentlicht (Wübbena, Bagge 2002).

#### 3.5.7.2 Datenformate für Postprocessing-Anwendungen

Das empfängerunabhängige Austauschformat RINEX (Gurtner 2000) hat nur mittelbar mit der Echtzeitpositionierung zu tun. Zeitgleich mit der Ausstrahlung der RTCM-Korrekturdaten werden auf den Referenzstationen die GPS-Beobachtungen in RINEX-Dateien archiviert. Eine Reihe von Nutzern, deren Genauigkeitsanforderungen über den Möglichkeiten der PDGPS-Echtzeitpositionierung liegen, benötigt diese Daten für das Postprocessing eigener GPS-Beobachtungen. Auch für die Referenzstationsbetreiber

sind die RINEX-Daten Grundlage für eigene Qualitätsuntersuchungen, z.B. zur Stabilität der Referenzstationen. Ein weiterer Nutzen ergibt sich aus den Untersuchungen zu dieser Arbeit, für die ein Verfahren entwickelt wurde, RINEX-Daten in RTCM-Daten zu wandeln und umgekehrt. Dieses in Kap. 6 beschriebene Verfahren bildet die Grundlage für die Simulation der Echtzeitpositionierung, die dann sinnvoll ist, wenn aufgrund von Ausfällen der Datenkommunikation PDGPS-Lösungen nicht verfügbar sind oder die Lösungen unter verschiedenen Bedingungen analysiert werden sollen.

Die ASCII-basierten RINEX-Dateien benötigen sehr viel Speicherplatz, weshalb sich für die systematische Archivierung das Compact RINEX-Format durchgesetzt hat. Nach einem Algorithmus von Hatanaka (1998) werden die redundanten Informationen aus den RINEX-Daten eliminiert, die Zeitreihen der Code- und Trägerphasenbeobachtungen durch mehrfaches Differenzieren ausgedünnt und die resultierenden Dateien abschließend mit der UNIX-Standardroutine compress auf einen Bruchteil der Ausgangsgröße komprimiert.

Für den schnellen Datenaustausch quasi in Echtzeit zwischen GPS-Monitorstationen für Satelliten in niedrigen Erdumlaufbahnen (LEO), die selbst mit GPS-Empfängern ausgestattet sind wie beispielsweise CHAMP, wurde Binary RINEX (BINEX) vorgeschlagen (Galas, Köhler 2001). In den binären Datensätzen können alle Daten aus den bislang verfügbaren Formaten wie RINEX Beobachtungs-, Navigations- und meteorologischen Dateien, Antennenphasenzentrumskorrekturen (ANTEX), ionosphärische TEC Gitterdateien (IONEX), Ephemeriden (sp3) und Netzlösungen (SINEX) empfängerunabhängig zusammengefasst werden. Compact RINEX und BINEX können zwar als kontinuierlicher Datenstrom insbesondere über das Internet verteilt werden, sind aber aufgrund der Datenstruktur und der längeren Laufzeiten für die präzise Echtzeitpositionierung ungeeignet.

### 3.5.7.3 Datenformat für Nutzeranwendungen

Abschließend ist noch ein für Schnittstellen maritimer elektronischer Geräte entwickelter Standard zu behandeln, der sich auch für die Weiterverarbeitung insbesondere von GPS-Echtzeitlösungen weltweit etabliert hat. Dieser Standard der U.S. National Marine Electronics Association (NMEA) vereinfacht die Kommunikation zwischen dem GPS-Empfänger bzw. der PDGPS-Auswertesoftware und der Anwendungssoftware des Nutzers sowie weiteren angeschlossenen Instrumenten. Soweit also die empfangerte oder die externe PDGPS-Auswertesoftware Informationen und Lösungen nicht in einem herstellereigenen Format für den Nutzer bereitstellt, ist das NMEA-Format eine allgemein genutzte Grundlage für die weitere Datenverarbeitung des Nutzers.

Der NMEA 0183 Schnittstellenstandard definiert die elektrischen Signale, Datenübertragungsprotokolle und Datensätze für serielle Datenbusse. In einem solchen Datenbus kann immer nur ein angeschlossenes Gerät senden (talker), während alle anderen Geräte empfangen (listeners). Mit dem NMEA 0183 Standard wird die reibungslose Datenkommunikation zwischen verschiedensten elektronischen Sensoren, Kommunikationsgeräten und Navigationssystemen ermöglicht. Die Daten werden im ASCII-Format in Sätzen von 20 bis maximal 80 Zeichen übertragen. Ein typisches Beispiel für einen solchen Datensatz ist die Zeile

```
$GPGGA,135142,5223.1353,N,00942.7396,E,2,07,1.01,69.6,M,47.0,M,5,0832*76
```

die mit einem Schlüssel (\$GPGGA) eingeleitet wird und mit einer Prüfsumme (\*76) sowie den nicht sichtbaren Steuerzeichen für Zeilenende und Zeilenvorschub endet. Der einleitende Schlüssel identifiziert das sendende Gerät (GP für GPS-Empfänger) und spezifiziert den nachfolgenden Datensatz (GGA: Global Positioning System Fix Data). Die Bedeutung der dazwischenliegenden, durch Komma getrennten Datenfelder ist Tab. 3.4 zu entnehmen, in der die Inhalte für drei der gebräuchlichsten NMEA-Formate in PDGPS-Echtzeitanwendungen aufgelistet sind. Der Datensatz GLL (Geographic Position,

Tabelle 3.4: Inhalte der für GPS-Anwendungen gebräuchlichsten NMEA-Formate

NMEA-Format	GGA	GLL	GSV
UTC der Positionsbestimmung [hhmmss.ss]	•	•	
Ellipsoid. Breite (N/S), Länge (E/W) [ddmm.mmmm]	•	•	
GPS-Qualitätsindikator	•		
Anzahl verwendeter Satelliten	•		•
HDOP	•		
Meereshöhe der Antenne [m]	•		
Einheit der Antennenhöhe [m]	•		
Geoidundulation	•		
Einheit der Geoidundulation [m]	•		
Alter differentieller GPS-Daten [s]	•		
Identifikator der differentiellen Referenzstationen	•		
Status		•	
Gesamtanzahl der Nachrichten			•
Nachrichtenummer			•
Satelliten PRN-Nummer			•
Elevation [deg]			•
Azimut [deg]			•
SNR			•

Latitude/Longitude) umfasst die Position eines Nutzers und den Zeitpunkt der Positionsbestimmung. Die Positionen der GPS-Satelliten wird im Datensatz GSV (GPS Satellites in View) übertragen.

Die aktuelle Version 3.01 des Standards stammt aus dem Jahr 2002. Darüber hinaus wurde vor kurzem der NMEA 2000 Standard veröffentlicht, der speziell die Anforderungen an serielle Datenkommunikationsnetze an Bord von Schiffen festlegt.

Über die Weiterverarbeitung von Lösungen hinaus wird das NMEA-Format speziell im SAPOS-Dienst genutzt, um die Position des Rovers zur Anforderung von Daten einer Virtuellen Referenzstation (Kap. 4.3.6) an die Vernetzungszentrale zu melden. Für den Einsatz des SAPOS-Decoders musste eigens eine NMEA-kompatible Schnittstelle (\$PGPPADV) definiert werden. In zwei Nachrichtentypen werden die Position des Rovers und die Positionen der Satelliten dem Decoder mitgeteilt, der daraufhin die empfangenen Flächenkorrekturparameter für die Roverposition individualisiert.

## 4 PDGPS-Echtzeitpositionierung in Referenzstationsnetzen

### 4.1 Einleitung

Bei relativen GPS-Beobachtungsverfahren gibt es drei Maßnahmen, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Lösungen zu steigern: durch eine Verlängerung der Beobachtungsdauer, durch simultane Beobachtungen auf zusätzlichen Referenzpunkten und durch mehrfache Wiederholung der Beobachtungen auf allen Punkten. Da bei der differentiellen Echtzeitpositionierung eine Minimierung der Beobachtungsdauer angestrebt wird, muss die notwendige Redundanz aus Multireferenzstationslösungen gewonnen werden. Eine hohe Zuverlässigkeit lässt sich nur durch unabhängige Wiederholungsmessungen gewährleisten, die jedoch nicht bei jeder Anwendung möglich sind.

Bei Postprocessinglösungen werden alle simultan aufgezeichneten Beobachtungen, sowohl die der Referenzstationen als auch die der Rover, gemeinsam ausgewertet. Bei Verwendung von Doppeldifferenzbeobachtungen werden im Parametereliminationsverfahren die linear unabhängigen Basislinien ausgeglichen. Die in Kapitel 2 beschriebene Parameterschätzung ermöglicht im Unterschied dazu die Ausgleichung der undifferenzierten Beobachtungen in einer echten Multistationslösung, die zusätzlich zu den gesuchten Koordinaten vollständige Kovarianzinformationen für alle Punkte und darüber hinaus auch die zusätzlichen geschätzten Parameter bereitstellt.

Diese Vorgehensweise ist theoretisch auf Echtzeit-Multistationslösungen übertragbar, widerspricht aber den differentiellen Positionierungskonzepten (Kap. 3) und ist aus praktischen Gründen nicht sinnvoll. Die Übertragung der Korrekturdaten aller einzubeziehenden Referenzstationen stellt eine hohe Belastung für die Datenkommunikationsverbindungen dar und setzt eine leistungsfähige Auswertesoftware samt Hardware auf Seiten des Rovers voraus. Die Auswertung ist als Echtzeitlösung kaum realisierbar, wohl aber als near-real-time-Verfahren. Dabei prozessiert der Nutzer im Feld die RINEX-Daten der Referenzstationen, die er zuvor per Mobilfunk- oder Internetverbindung heruntergeladen hat, mit konventionellen GPS-Auswertelgorithmen. Dies setzt bei dem Nutzer weitaus tiefere Kenntnisse der GPS-Auswertung voraus als beim PDGPS-Positionierungsverfahren.

Die als Vernetzung bezeichnete PDGPS-Echtzeitpositionierung in Referenzstationsnetzen erfordert daher neue Ansätze, Korrekturen aus einer kontinuierlichen Multistationslösung zu generieren und diese allen Nutzern so bereitzustellen, dass sie möglichst kompatibel zu den in Kap. 3 beschriebenen etablierten Korrekturdatenverfahren sind. Diese Aufgabe beinhaltet zum einen die Weiterentwicklung der funktionalen und stochastischen Modelle der GPS-Auswertung, also die Modellbildung, zum anderen muss die Frage der Repräsentation behandelt werden, in welcher mathematischen Form die Multistationslösung für alle Nutzer zur Verfügung gestellt wird. Diesen beiden Aufgabenstellungen ist das vorliegende Kap. 4 gewidmet, wobei der Schwerpunkt auf der Erläuterung verschiedener Repräsentationsmodelle liegt. Die Modellbildung wird im Zusammenhang mit ausgewählten Repräsentationsmodellen behandelt, die wesentlichen Aspekte betreffend kann aber auf Kap. 2 verwiesen werden. Die technische Realisierung der Vernetzung, die im Hinblick auf die Echtzeitanforderungen eine besondere Herausforderung darstellt, ist Gegenstand des nachfolgenden Kapitels 5. Auf der Basis der in Kap. 4 und Kap. 5 erläuterten mathematischen, technischen und logistischen Grundlagen wurden Untersuchungen in der Entwicklungsphase der norddeutschen SAPOS-Netze durchgeführt und zwei Echtzeit-Referenzstationsnetze in Brasilien aufgebaut. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Kap. 6 zusammengefasst. Die Schlussfolgerungen aus den theoretischen und experimentellen Erkenntnissen der Kapitel 2 bis 6 sind in den beiden Kapiteln 7 und 8 dokumentiert.

## 4.2 Konzepte zur Vernetzung von Referenzstationen

### 4.2.1 Echtzeit-Multistationslösungen im DGPS-Bereich

Konzepte für Echtzeit-Multistationslösungen wurden für die codebasierte DGPS-Positionierung seit Anfang der neunziger Jahre entwickelt. Neben der Kompensation entfernungsabhängiger Fehlereinflüsse, die eine höhere Genauigkeit und eine homogenere Genauigkeitsverteilung über größere Entfernungen ermöglicht, steht der wirtschaftliche Aspekt im Vordergrund, ein Gebiet mit möglichst wenigen Stationen zu überdecken.

Die wesentlichen Begriffe und Konzepte der DGPS-Netze seien an dieser Stelle aufgeführt, weil deren Entwicklung und zugrundeliegenden Modelle ein Anknüpfungspunkt für die PDGPS-Netze darstellen, ohne dass allerdings die Modelle wegen der Unterschiede in der Code- und Trägerphasenauswertung unmittelbar übertragbar wären.

Der Arbeitsbereich einer einzelnen, autonomen DGPS-Referenzstation (Single Base DGPS) beträgt bei einer Genauigkeitsforderung von wenigen Metern ohne weiteres über 100 km. Da solche Stationen einem Leuchtturm ähnlich zuerst von der U.S. Coast Guard zur küstennahen Schiffsnavigation aufgestellt wurden, tragen sie auch die Bezeichnung Beacon DGPS. Eine Kette von Referenzstationen erweitert das DGPS-Konzept (Extended DGPS) insofern, als ein Nutzer sich immer über die nächstgelegene Station positioniert und Korrekturdaten weiterer empfangbarer Stationen zur Kontrolle verwenden kann. Ein Beispiel für ein erweitertes DGPS-System in Deutschland stellt der im UKW-Funk sendende Korrekturdatendienst EPS/RASANT dar. Die Vernetzung benachbarter Referenzstationen zu Dreiecks- oder Vierecksmaschen ermöglicht die Interpolation der entfernungsabhängigen atmosphärischen und Satellitenbahnfehler für den Ort eines Nutzers. Solche lokalen oder regionalen DGPS-Netze (Local bzw. Regional Area DGPS (LADGPS, RADGPS)) erfordern GPS-Multistationslösungen und den Einsatz mathematischer Interpolationsverfahren. LADGPS-Systeme arbeiten mit skalaren Pseudostreckenkorrekturen im RTCM-Format (Kap. 3.5.4), die mittels terrestrischer Kommunikationseinrichtungen im Broadcastverfahren ausgestrahlt werden.

Zwar bieten LADGPS-Netze eine homogenere Genauigkeitsverteilung innerhalb der Netzmasche sowie eine höhere Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit aufgrund der größeren Redundanz. Ungünstige GPS-Konstellationen (DOP) und eine zu geringe Anzahl sichtbarer Satelliten können aber auch LADGPS-Systeme nicht ausgleichen. Über größere Entfernungen von mehreren 100 km bietet DGPS nach Deaktivierung von SA keinen wesentlichen Genauigkeitsvorteil mehr gegenüber der absoluten GPS-Positionierung, weshalb der auf der Langwelle sendende Korrekturdatendienst ALF bis Ende 2005 abgeschaltet wird. Für Netze nationaler, kontinentaler oder gar globaler Ausdehnung erfordern die auf Beobachtungsresiduen basierenden LADGPS-Systeme eine zu hohe Anzahl an Referenzstationen, ein Übergang zu zweckmäßigeren Modellen ist notwendig.

DGPS-Netze für sehr weiträumige Gebiete (Wide Area DGPS (WADGPS)) wie Europa oder den kontinentalen Teil der U.S.A (CONUS) erfordern Ansätze, die mit einer weitaus geringeren Anzahl an Referenzstationen auskommen (Sparse Networks). Zwar können WADGPS-Netze auch mit skalaren Beobachtungsraumkorrekturen realisiert werden, wie beispielsweise OmniSTAR, entscheidend leistungsfähiger sind sie jedoch, wenn sie auf Zustandsraummodellen basieren (Mueller 1994). Dabei werden die räumlichen und zeitlichen Variationen der systematischen GPS-Fehler nach ihren Quellen getrennt modelliert, was eine bessere Ableitung ortsbezogener Korrekturen für einen Nutzer ermöglicht. Der weitmaschige Netzaufbau ermöglicht die Überdeckung von Gebieten, die sich nicht als Referenzstationsstandorte eignen, z.B. Deutsche Bucht oder Ostsee. Das Konzept der WADGPS wurde insbesondere von Kee (1996) geprägt. Die bekannteste Realisierung eines WADGPS ist das für die Luftfahrt entwickelte Wide Area Augmentation System (WAAS) der U.S. Federal Aviation Administration (FAA).



Globale DGPS-Netze (GDGPS), auch als weltweite DGPS (WWDGPS) Netze bekannt, unterscheiden sich von WADGPS insofern, als sie alle Satelliten simultan beobachten können. Dies erlaubt die Ableitung aller Zustandsparameter für jede einzelne Fehlerquelle in einem einheitlichen System. Jedoch führen die langen Übertragungswege und großen Datenmengen zu einem hohen Aufwand bei der Datenübertragung und Echtzeitberechnung der Zustandsvektoren, die zu keinen höheren Latenzzeiten führen dürfen. Die Datenübertragung erfolgt über das Internet oder über geostationäre Kommunikationssatelliten, deren Empfang jedoch in hohen Breiten starken Einschränkungen unterliegt. Die Entwicklung und der Aufbau weiträumiger oder globaler DGPS-Netze ist sehr aufwendig und kostenintensiv. Angesichts der Komplexität des Gesamtsystems kann eine Fehleranfälligkeit nicht ausgeschlossen werden.

#### 4.2.2 Echtzeit-Multistationslösungen im PDGPS-Bereich

Die präzise, trägerphasenbasierte Echtzeitpositionierung in einem Referenzstationsnetz ist ungleich schwieriger als eine Multistationslösung im Postprocessing oder in einem DGPS-Netz. Ist die schnelle Mehrdeutigkeitslösung über kurze Entfernungen bis ca. 10 km im allgemeinen möglich, gelingt dies zwischen den Referenzstationen über mittlere Entfernungen bis 100 km nur aufgrund der bekannten Referenzstationskoordinaten und der Berücksichtigung der wesentlichen entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse. Für die Übertragung dieser Information an einen einzelnen Nutzer zur Unterstützung seiner schnellen Mehrdeutigkeitslösung innerhalb des Referenzstationsnetzes mussten neue Modelle entwickelt werden. Neben der Modellbildung war auch eine zu dem allgemein verbreiteten RTCM-Korrekturdatenformat kompatible Repräsentation der Vernetzungsinformation zu entwerfen. Diese Lösungen müssen jedoch so gestaltet sein, dass die Vernetzung auch mit konventionellen RTK-Empfängern und Auswertesoftware ohne umfangreiche Anpassungen nutzbar ist.

Präzise Echtzeit-Multistationslösungen bestehen aus den folgenden, in Abb. 4.1 dargestellten, Arbeitsschritten, wobei es für die einzelnen Schritte unterschiedliche Realisierungen gibt. Der erste und wichtigste Schritt ist die Mehrdeutigkeitslösung für die Trägerphasenmessungen aller Referenzstationen im Netz. Dazu müssen die Stationskoordinaten einschließlich der Antennenkorrekturen hochgenau bekannt sein, gegebenenfalls können auch prädierte Satellitenephemeriden einbezogen werden. Aus der Differenz zwischen den gerechneten und gemessenen Beobachtungen werden Residuen der Pseudostrecken, Trägerphasen und Linearkombinationen davon abgeleitet. Die Residuen dienen zur Modellierung der entfernungsabhängigen Fehler im Referenznetz und müssen zur Übertragung an die Nutzer in einer geeigneten Weise parametrisiert werden. Die Parameter dieses Repräsentationsmodells, das zur Interpolation der entfernungsabhängigen Fehler für den Standort des Nutzers dient, werden als Netzkorrekturen oder Vernetzungsparameter bezeichnet. Die Vernetzungsparameter sind zusammen mit den RTCM-Korrekturdaten zum Nutzer zu übertragen, wo sie individualisiert werden, d.h. die für die vom Standort des Nutzers aus beobachteten Satelliten zutreffenden Netzkorrekturen abgeleitet werden.

Die Unterschiede in den Realisierungen der Arbeitsschritte beginnen bereits bei der Lösung der Beobachtungsgleichung durch entweder Parameterelimination oder durch Parameterschätzung, wie in Kap. 2 erläutert. Diese Grundentscheidung schränkt bereits die weiteren Möglichkeiten bei der Modellierung der Fehleranteile ein. Diese werden im nachfolgenden Abschnitt gemeinsam mit verschiedenen Repräsentationsmodellen diskutiert. Die verbindliche Festlegung einer als Standard allgemein akzeptierten, herstellerneutralen Repräsentation mit möglichst geringem Korrekturdatenumfang hat sich bislang als sehr schwierig erwiesen und findet erst mit dem neuen RTCM SC-104 Version 3 Standard einen vorläufigen Abschluss.

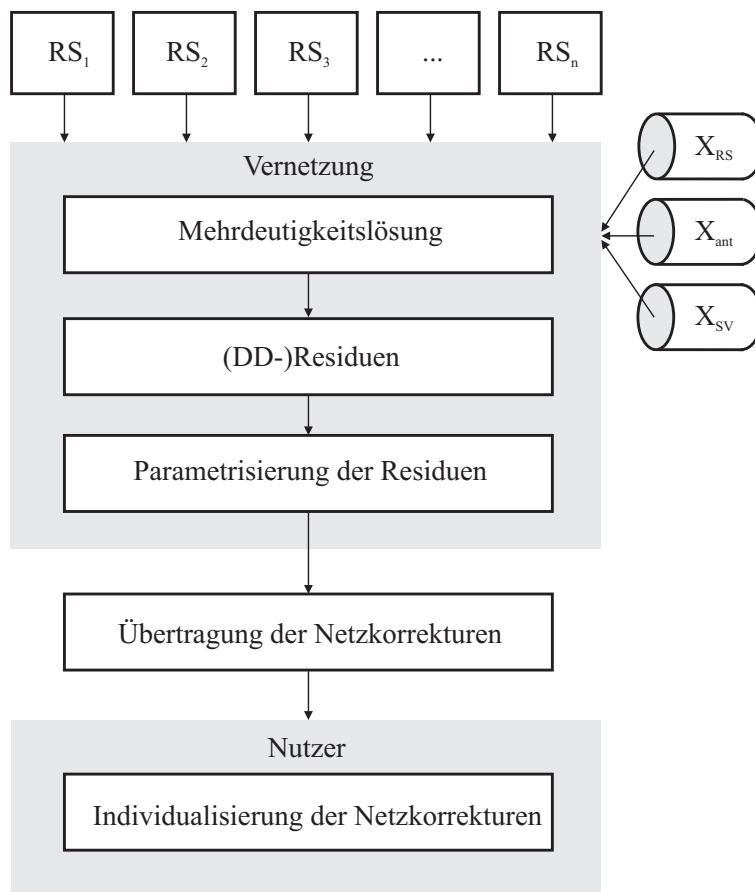


Abbildung 4.1: Wesentliche Arbeitsschritte einer präzise Echtzeit-Multistationslösung

## 4.3 Vernetzungs- und Repräsentationsmodelle

### 4.3.1 Ansätze zur Referenzstationsvernetzung

Zur Vernetzung von Referenzstationen mit dem Ziel, entfernungsabhängige Fehler über mittlere Entfernungen zu reduzieren, um schnelle Mehrdeutigkeitslösungen und damit die präzise Positionierung in Echtzeit zu ermöglichen, gibt es folgende grundsätzliche Möglichkeiten, die in den nachfolgenden Abschnitten detaillierter erläutert werden.

Die Echtzeit-Multistationslösung kann vom Nutzer selbst berechnet werden, wenn die Referenzstationen einschließlich der Kommunikationsverbindung geeignet sind, Rohdaten in Echtzeit zu übertragen. Die Rohdaten können in den RTCM-Nachrichtentypen 18/19 oder einem herstellereigenen Format übertragen werden. Die Mehrdeutigkeitslösung sowohl im Referenzstationsnetz als auch für den Rover erfolgt in einem Berechnungsgang auf dem Rover, womit diesem eine hohe Rechenleistung abverlangt wird. Zur Datenkommunikation ist im Prinzip nur der Mobilfunk geeignet, die große Menge an Rohdaten mit einer Latenzzeit von unter 1 s zu übertragen. Diese elementare Lösung wurde von Trimble für das RTCM SC-104 Version 3 Format als Standard vorgeschlagen.

Für die Ausstrahlung (Broadcast) von Vernetzungsparametern eignen sich drei Ansätze. Das Master-Auxiliary-Konzept (Kap. 4.3.2) von Euler et al. (2001) wird Grundlage der Netzkorrekturen im RTCM 3 Standard werden. Auf der Basis von Flächenkorrekturparametern (FKP) (Kap. 4.3.4) haben Wübbena et al. (1996) das erste echtzeitfähige Verfahren zur Multistationslösung realisiert, was allerdings auch Han, Rizos (1996) für sich beanspruchen. Townsend et al. (2000) haben ein Gitter von Vir-

tuellen Referenzstationen (Kap. 4.3.5.6) vorgeschlagen, um die Vorteile der VRS mit denen der Broadcastverteilung von Korrekturdaten zu kombinieren. Sie setzten dabei auf das Kollokationsmodell von (Raquet 1998) auf (Kap. 4.3.5). Dieses von (Fortes 2002) weiterentwickelte Modell ist allerdings nicht echtzeitfähig.

Das Konzept der Virtuellen Referenzstationen (VRS) (Kap. 4.3.6) hat für die präzise Echtzeitpositionierung mit der zunehmenden Verbreitung des Mobilfunks erheblich an Bedeutung gewonnen. Die bekannteste Echtzeit-Realisierung stammt von Trimble terrasat (Vollath et al. 2000b). Allerdings sind VRS bereits zuvor für DGPS- (Weber, Tiwari 1995) und Postprocessing-Anwendungen entwickelt und eingehend untersucht worden (van der Marel 1998, Wanninger 2000).

Das Precise Point Positioning (PPP) ist ein weiteres Konzept, das sich in Bezug auf präzise Echtzeit-Multistationslösungen noch in der Entwicklung befindet (Kap. 4.4). Es hat sich als hochpräzises Verfahren für großräumige und globale Postprocessing-Anwendungen etabliert (Zumberge et al. 1997) und ermöglicht eine globale Echtzeitpositionierung mit Dezimetergenauigkeit (Muellerschoen et al. 2001). Mit der Realisierung in einem vollständigen Zustandsraummodell (Kap. 7) wird zukünftig auch die präzise, zentimetergenaue Positionierung angestrebt.

Autoren wie Fotopoulos (2000) oder Dai et al. (2003) behandeln die Bestimmung der Vernetzungsparameter als reines Interpolationsproblem. Sie gliedern die Vernetzungskonzepte nach den Ansätzen zur Parametrisierung der Residuen (Rizos, Han 2003):

- Linear combination model (LCM): Han, Rizos (1996), Han (1997)
- Distance-Based Linear Interpolation Method (DIM): Gao et al. (1997)
- Linear Interpolation Method (LIM): Wanninger (1995), Wübbena et al. (1996)
- Low-Order Surface Model (LSM): Wübbena et al. (1996), Fotopoulos (2000), Schaer et al. (2000), Varner (2000)
- Least Squares Collocation Method (LSC): (Raquet 1998, Fortes 2002, van der Marel 1998)

In dieser Betrachtungsweise und aufgrund der mathematischen, auf simulierten Daten beruhenden Untersuchungen ist das Ergebnis von Dai et al. (2003), dass alle aufgeführten Interpolationsansätze zu gleichwertigen Ergebnissen führen, nicht verwunderlich.

#### 4.3.2 Einheitliches Mehrdeutigkeitsniveau

Um die mit der Rohdatenübertragung in Echtzeit verbundenen hohen Anforderungen an die Kommunikationseinrichtungen und an die Auswertesoftware eines Nutzers zu reduzieren, gleichzeitig nur herstellerneutrale und zum RTCM SC-104 Standard konforme Vernetzungsinformationen zu nutzen, haben Euler et al. (2001) einen Ansatz vorgeschlagen, der auf dem gemeinsamen Mehrdeutigkeitsniveau aller Referenzstationen eines Netzes basiert. Zeitlich nach den nachfolgend beschriebenen Vernetzungs- und Repräsentationsmodellen entwickelt, stellt der Ansatz einen Zwischenschritt für die Entwicklung eines RTCM SC-104 Standards für die Referenzstationsvernetzung dar. Der Standard muss herstellerneutral sein, die Ausstrahlung der Vernetzungsinformation mit möglichst geringer Datenmenge ermöglichen und aus einer satellitenunabhängigen Fehlerrepräsentation bestehen, ohne spezifische Fehlermodelle vorzuschreiben. Ziel ist es, die Interoperabilität sowohl zwischen den Referenzstations- und Roversystemen verschiedener Hersteller als auch die Verknüpfung verschiedener Referenznetze zu ermöglichen.

Das Konzept des gemeinsamen Mehrdeutigkeitsniveaus sieht als ersten und wichtigsten Schritt die Mehrdeutigkeitslösung im Referenzstationsnetz im Rahmen einer Echtzeit-Multistationsauswertung vor. Die Trägerphasenbeobachtungen aller Referenzstationen beziehen sich dann auf das gleiche – nicht notwendigerweise wahre – Mehrdeutigkeitsniveau. Ausgestrahlt werden die Trägerphasenkorrekturen (RTCM-Typen 20/21) einer Master-Referenzstation und darauf bezogen die Differenzen der Trägerphasenkorrekturen aller weiteren Referenzstationen, der sogenannten „slave“ oder „auxiliary“ Stationen

(Zebhauser et al. 2002), woraus sich auch die Bezeichnung als Master-Auxiliary-Ansatz ableitet. Weiterhin müssen die Koordinaten der Master-Referenzstation und die Koordinatendifferenzen der weiteren Referenzstationen übertragen werden. Differenzen werden verwendet, um das Datenvolumen bestmöglich zu reduzieren.

Ausgehend von der Langform (4.1) der Beobachtungsgleichung (2.9) für Trägerphasenmessungen,

$$\Phi_{s,j}^i = |\mathbf{R}_j^i| + c(\delta t_{s,j} - \delta t_s^i) + \delta T_j^i + \frac{\mathbf{R}_j^i}{|\mathbf{R}_j^i|} \delta \mathbf{o}^i - \delta I_{s,j}^i + \lambda_s N_{s,j}^i + \varepsilon_{s,j}^i \quad (4.1)$$

wird die Einfachdifferenz zwischen Stationen nach (2.25) gebildet. Bringt man die gut zu schätzenden Anteile auf die linke Seite der Gleichung, entspricht die Summe der Residuen nach Festsetzung der Mehrdeutigkeiten den auf der rechten Seite zusammengefassten entfernungsabhängigen Fehlern einschließlich des zufälligen Messfehlers:

$$\Delta \Phi_{s,jk}^i - \Delta |\mathbf{R}_{jk}^i| - c \Delta \delta t_{s,jk} - \lambda_s \Delta N_{s,jk}^i = \Delta \delta T_{jk}^i + \Delta \frac{\mathbf{R}_{jk}^i}{|\mathbf{R}_{jk}^i|} \delta \mathbf{o}^i - \Delta \delta I_{s,jk}^i + \Delta \varepsilon_{s,jk}^i \quad (4.2)$$

Die auf eine Referenzstation bezogenen Residuen  $r = f(\Delta \delta T, \Delta \delta \mathbf{o}, \Delta \delta I, \Delta \varepsilon)$  werden komplett zum Nutzer übertragen, während in anderen Vernetzungsansätzen die entfernungsabhängigen Fehleranteile in unterschiedlicher Weise modelliert und nur die Modellparameter, wiederum in unterschiedlicher Form, übertragen werden. Für die Trägerphasenkorrekturen der Master-Referenzstation wird der RTCM-Nachrichtentyp 20 genutzt, für die Korrekturdifferenzen der Auxiliary-Referenzstationen wird ein analog zum Typ 20 aus der linken Seite der Gleichung (4.2) gebildeter neuer Nachrichtentyp vorgeschlagen (Euler et al. 2001):

$$\delta^{RTCM} \Delta \Phi_{s,jk}^i = -\Delta \Phi_{s,jk}^i + \Delta |\mathbf{R}_{jk}^i| + c \Delta \delta t_{s,jk} + \lambda_s \Delta N_{s,jk}^i \quad (4.3)$$

Statt der Korrekturdifferenzen für die beiden Trägerphasen können diese auch in den dispersiven und den nicht-dispersiven Anteil aufgespalten werden (Euler et al. 2004), um die zu übertragende Datenmenge weiter zu reduzieren.

Der Master-Auxiliary-Ansatz ermöglicht den Nutzern die Wahl eines eigenen Interpolationsmodells. Korrekturen für die Roverposition können direkt aus den stationsbezogenen Trägerphasenkorrekturen beziehungsweise Korrekturdifferenzen abgeleitet werden. Es bleibt den Nutzern überlassen, die originären Trägerphasenkorrekturen jeder Referenzstation zu rekonstruieren und darin Flächenkorrekturparameter selbst zu rechnen, oder Korrekturen einer virtuellen Referenzstation zu generieren. Euler et al. (2003) selbst haben zwei verschiedene Interpolationsansätze, eine entfernungsabhängige Gewichtung und eine Flächeninterpolation, getestet. Die Interpolationsebene erwies sich dabei als geeigneter zur Modellierung der in den Korrekturdifferenzen enthaltenen systematischen regionalen Effekte, auch über eine Referenzstationsmasche hinaus.

### 4.3.3 Fehlerparametrisierung im Positionsraum

Einen einfachen broadcastfähigen Ansatz zur Modellierung der entfernungsabhängigen Fehler, der von Loomis et al. (1991) zur Anwendung in DGPS-Netzen als Alternative zu den weitaus komplexeren Zustandsraumalgorithmen in WADGPS-Netzen vorgeschlagen wurde, hat Varner (2000) auf PDGPS-Netze angewendet. Er basiert auf einer Taylor-Entwicklung der GPS-Beobachtungsgleichung. Die partiellen Ableitungen bilden eine Flächenfunktionen niedriger Ordnung, deren Parameter sich mit geringen Bandbreitenanforderungen übertragen lassen. Damit stellt der nach der englischen Abkürzung (Partial Derivative Algorithm) bezeichnete PDA-Ansatz ein mögliches Repräsentationsmodell dar.

PDA basieren mathematisch auf einer Taylor-Entwicklung der GPS-Fehlerfunktion  $g$  um einen Entwicklungspunkt  $\mathbf{P}_0$  (Bronstein, Semendjajew 1989). Wird die Taylor-Reihe üblicherweise nach dem ersten

linearen Glied abgebrochen, soll im folgenden noch das zweite quadratische Glied berücksichtigt werden (Varner 2000).

$$g(\mathbf{P}) = g(\mathbf{P}_0) + \frac{\partial g}{\partial \mathbf{P}_0} (\mathbf{P} - \mathbf{P}_0) + \frac{1}{2} (\mathbf{P} - \mathbf{P}_0) \frac{\partial^2 g}{\partial \mathbf{P}_0^2} (\mathbf{P} - \mathbf{P}_0) + O(h_3) \quad (4.4)$$

Da die Fehlerparametrisierung im Positionsraum erfolgt ist sie für dreidimensionale Koordinaten zu entwickeln. Mit dem Positionsvektor  $\mathbf{P} = [P_x P_y P_z]^T$  lautet der Vektor der partiellen Ableitungen 1. Ordnung

$$\frac{\partial g}{\partial \mathbf{P}_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial x} & \frac{\partial g}{\partial y} & \frac{\partial g}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

und der Vektor der partiellen Ableitungen 2. Ordnung

$$\frac{\partial^2 g}{\partial \mathbf{P}_0^2} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 g}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 g}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 g}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 g}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2 g}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

Mit den bekannten Referenzstationskoordinaten und den Doppeldifferenz-Trägerphasenbeobachtungen zwischen den Referenzstationen werden die unbekannt Koeffizienten  $g(\mathbf{P}_0)$ ,  $\frac{\partial g}{\partial \mathbf{P}_0}$ ,  $\frac{\partial^2 g}{\partial \mathbf{P}_0^2}$  der Taylor-Reihe (4.4) geschätzt. Nach Lösung der Doppeldifferenzmehrfachdeutigkeiten zwischen der Basis-Referenzstation  $R$  und einer zweiten Referenzstation  $P$  sowie dem Satellitenpaar  $s, b$  ergibt sich aus der Differenz zwischen der gemessenen ( $\Delta \nabla \Phi_{PR}^{sb}$ ) und einer prädizierten Doppeldifferenzbeobachtung ( $\Delta \nabla \tilde{\Phi}_{PR}^{sb}$ ) der Messfehler  $\kappa_{PR}^{sb}$  (Varner 2000).

$$\kappa_{PR}^{sb} = \Delta \nabla \Phi_{PR}^{sb} - \Delta \nabla \tilde{\Phi}_{PR}^{sb} \quad (4.7)$$

Der Messfehler  $\kappa_{PR}^{sb}$  ist innerhalb des Vernetzungsmodells zugleich eine Messgröße, die durch die Modellfunktion (4.4) approximiert werden soll. Den Modellfehler  $\xi^{sb}(\mathbf{P})$  als Differenz zwischen der Vernetzungs-Messgröße  $\kappa_{PR}^{sb}$  und dem Wert  $g^{sb}(\mathbf{P})$  der Modellfunktion gilt es zu minimieren.

$$\xi^{sb}(\mathbf{P}) = \kappa_{PR}^{sb} - g^{sb}(\mathbf{P}) \quad (4.8)$$

Varner (2000) vereinfacht (4.4) unter der Annahme, dass die entfernungsabhängigen Fehler in der Horizontalen linear sind. Lediglich in der vertikalen Achse lässt er ein nichtlineares Verhalten in der Ionosphäre und Troposphäre zu und berücksichtigt zunächst noch die partiellen Ableitungen 2. Ordnung. Mit Hinweis auf Szintillationen als stärkste Quelle von Unregelmäßigkeiten der Ionosphäre, die sich aber selbst durch nichtlineare Glieder der PDA-Funktion nicht ausreichend modellieren lassen und daher dem allgemeinen Messrauschen im Netz zuzurechnen sind, verzichtet er dann später auf den quadratischen Term in (4.9). Diese multidimensionale Funktion

$$g(\mathbf{P}) = \alpha + \chi(x_P - x_{P_0}) + \beta(y_P - y_{P_0}) + \delta(z_P - z_{P_0}) + \gamma(z_P - z_{P_0})^2 + O(h_3) \quad (4.9)$$

ersetzt die Taylor-Reihe mit den folgenden Abkürzungen für die Differentialquotienten:

$$\begin{aligned} \alpha &= g(\mathbf{P}_0) \\ \beta &= \frac{\partial g}{\partial y} \\ \chi &= \frac{\partial g}{\partial x} \\ \gamma &= \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \\ \delta &= \frac{\partial^2 g}{2 \partial z^2} \end{aligned}$$

Der Parameter  $\alpha$  als partielle Ableitung an der Stelle  $\mathbf{P}_0$  repräsentiert die stationsabhängigen Fehleranteile. Er lässt sich bereits aus einer Minimalkonfiguration von zwei Referenzstationen berechnen. In dem reduzierten PDA-Modell (vgl. Loomis et al. (1991))

$$g_j = \alpha + \chi\Delta x_j + \beta\Delta y_j + \delta\Delta z_j + \varepsilon_g(P_j) \quad (4.10)$$

verbleiben noch vier Unbekannte, zu deren Lösung Beobachtungen von mindestens 5 Referenzstationen benötigt werden. Das PDA-Modell ist abhängig vom jeweiligen Netz auszuwählen. Die zeitvariablen Parameter werden in einem Gauß-Markov-Modell getrennt für jedes Satellitenpaar geschätzt.

Alle Untersuchungsergebnisse von Varner (2000) beruhen auf postprozessierten Lösungen ausschließlich statischer GPS-Beobachtungen. Er wendet die in der Arbeitsgruppe der University of Calgary übliche Vorgehensweise an. Dabei wird in einem ersten Postprocessing versucht, alle Mehrdeutigkeiten zu schätzen. Diese werden anschließend in ein zweites Postprocessing eingeführt, in dem nur noch die Fehlerparameter des PDA-Modells geschätzt werden.

Nach den Erkenntnissen von Varner (2000) ist die Parametrisierung der räumlichen Fehler nur im Positionsraum ausreichend. Die besten Ergebnisse wurden mit einem PDA-Modell 4. Ordnung ( $\alpha\beta\chi\delta$ -Modell) erzielt. Über Basislinien von 40 km wurden Lagegenauigkeiten von 1,5 cm erreicht. Die in der vertikalen Komponente erzielten Ergebnisse waren dagegen deutlich ungünstiger.

#### 4.3.4 Fehlerparametrisierung im Beobachtungsraum

##### 4.3.4.1 Einleitung

Ein einfaches und robustes Modell zur Interpolation entfernungsabhängiger Fehler stellen bilineare Flächenpolynome dar. Die Parameter des Flächenpolynoms bilden zugleich das zu übertragende Korrekturmodell, woraus die Bezeichnung Flächenkorrekturparameter (FKP) resultiert. Das Grundprinzip wurde erstmals von Wübbena et al. (1996) anhand theoretischer Untersuchungen vorgestellt, die auf der Diplomarbeit von Teuber (1996) beruhen. Es unterscheidet sich in zwei Punkten wesentlich von dem im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen, auf einer Taylor-Entwicklung beruhenden Korrekturmodell von Varner (2000), das sich letztlich ebenfalls auf eine lineare Interpolation der entfernungsabhängigen Fehler reduzieren lässt. Wie im nachfolgenden Abschnitt detaillierter ausgeführt, erfolgt zum einen die Parametrisierung im Beobachtungsraum. Zum anderen werden Flächenkorrekturparameter für zwei Ebenen berechnet, die unterschiedliche Anteile der entfernungsabhängigen Fehler repräsentieren. Neben der Berechnung der FKP wird auch auf deren Repräsentation, d.h. das Übertragungsmodell für die Korrekturdaten, eingegangen.

##### 4.3.4.2 Berechnung der FKP

Grundidee der Vernetzung ist die simultane Auswertung von Beobachtungen mehrerer Referenzstationen in einer Multistationsausgleichung, wie es im Postprocessing von Netzbeobachtungen gängige Praxis ist. Während jedoch im Postprocessing die Beobachtungen der Rover gemeinsam mit den Referenzstationen ausgewertet werden, will man bei der differentiellen Echtzeitpositionierung den dazu notwendigen Aufwand für den Datentransfer vermeiden. Deshalb müssen aus der Multistationsausgleichung Parameter eines geeigneten Fehlermodells abgeleitet werden, die die entfernungsabhängigen Fehler im Referenznetz ausreichend genau beschreiben. Zusammen mit den Korrekturdaten einer Referenzstation werden die Vernetzungsparameter zu einem Nutzer übertragen, der die Korrekturdaten durch Anwendung des Fehlermodells für seinen Standort verbessert und so die entfernungsabhängigen Fehleranteile weitgehend kompensieren soll. Die Trennung von Korrekturdaten und Flächenkorrekturparametern wurde im Hinblick auf die Aussendung der Daten per Funk im Broadcastverfahren sowie mit Rücksicht auf den

RTCM-Standard gewählt, der Vernetzungsinformationen bislang nicht vorsieht. Alternative Vorgehensweisen sind möglich, so wie sie zum Beispiel im Abschnitt über Virtuelle Referenzstationen vorgestellt werden.

Nach der Festsetzung der Mehrdeutigkeiten im Referenzstationsnetz werden aus den Residuen der Beobachtungsgleichungen die Parameter des Fehlermodells geschätzt. Die auf den Referenzstationen gemessenen Strecken werden aus dem Zustandsmodell für das gesamte Netzwerk gefiltert, um die zwischen den Stationen unkorrelierte Mehrwegeausbreitung herauszumitteln. Die Differenz zwischen den gefilterten und den berechneten Strecken für jeden Satelliten mit gelösten Mehrdeutigkeiten ergibt die Residuen für das Signal  $s$  (Wübbena, Willgalis 2001),

$$\delta \hat{r}_s = \hat{R}_{s,meas} - R_{s,comp} \quad (4.11)$$

die in dispersive Residuen  $\delta r_l$  der geometriefreien Linearkombination LI und in nicht-dispersive Residuen  $\delta r_0$  der ionosphärenfreien Linearkombination L0 aufgeteilt werden. Für die Linearkombinationen wird in dieser Arbeit die Notation nach Wübbena (1991) gewählt, andere häufig verwendete Bezeichnungen sind L3 für die ionosphärenfreie und L4 für die geometriefreie Linearkombination (Rothacher, Mervart 1996), vor allem im nordamerikanischen Raum sind auch die einfachen Abkürzungen *IF* bzw. *GF* gebräuchlich. Die geometrischen Residuen können noch weiter unterteilt werden in Residuen der Satellitenorbits und der Troposphäre. Diese Aufteilung ist wegen der unterschiedlichen Dynamik und Linearität der entfernungsabhängigen Fehlerkomponenten für die weitere Fehlermodellierung sinnvoll.

Die räumlich variierenden Residuen werden durch Polynomflächen approximiert. Dabei ist ein bilineares Polynom für Stationsabstände bis 100 km für cm-Genauigkeit ausreichend, wie praktische Untersuchungen von z.B. Wanninger (2000) zeigen. Größere Stationsabstände oder stärkere Fehlereinflüsse erfordern Polynomflächen zweiter oder höherer Ordnung (Abb. 4.2). Werden die Polynomflächen als Dreiecksflächen zwischen benachbarten Referenzstationen gebildet, ermöglicht dies eine optimale Approximation der Residuen. Dabei sind aber Unstetigkeiten bei dem Übergang zwischen benachbarten Referenzstationsmaschen nicht auszuschließen. Deshalb sollten zweckmäßigerweise die Polynomflächen über mehrere vernetzte Referenzstationen angepasst werden.

Die PDGPS-Korrekturen für einen Nutzer setzen sich zusammen aus den Streckenkorrekturen  $\delta r_{s,j}(t)$  und zusätzlichen, aus der Vernetzung berechneten Korrekturen  $\delta r_a(t)$ . Wegen ihrer hohen Dynamik müssen die Streckenkorrekturen sekundlich aufdatiert werden. Dagegen ändern sich die Netzkorrekturen langsamer, eine Aufdatierung im Abstand von zehn Sekunden ist ausreichend. In (4.12) werden aus Konformitätsgründen mit dem RTCM-Standard aus tatsächlich gemessenen Strecken berechnete Streckenkorrekturen eingesetzt, nicht die aus gefilterten Messungen abgeleiteten.

$$\delta r_{FKP}(t) = \delta r_{s,j}(t) + \delta r_a(t) \quad (4.12)$$

Für die zeitabhängigen Parameter  $a$  des Polynoms (4.13), die geometrisch die Neigung einer Ebene repräsentieren, wurde die Bezeichnung „Flächenkorrekturparameter“ (FKP) geprägt. Sie werden in einer Ausgleichung der Residuen (4.11) jeder Referenzstation geschätzt. Für jede der beiden Fehlerkomponenten  $\delta r_l$  und  $\delta r_0$  wird eine Ebene berechnet, deren Parameter individuell für jeden Satelliten und für jede Epoche geschätzt werden (Wübbena, Bagge 1997).

$$\delta r_a(t) = a_{\varphi,s}(t)(\varphi - \varphi_0) + a_{\lambda,s}(t)(\lambda - \lambda_0) \quad (4.13)$$

$\delta r_{FKP}$	Gesamtkorrektur
$\delta r_{s,j}$	Korrektur aus unvernetzter Referenzstation
$\delta r_a(t)$	Korrekturanteil aus Vernetzung
$a_{\varphi,s}, a_{\lambda,s}$	Flächenkorrekturparameter (FKP) für das Signal $s$
$\varphi, \lambda$	Position des Rovers
$\varphi_0, \lambda_0$	Position der Referenzstation

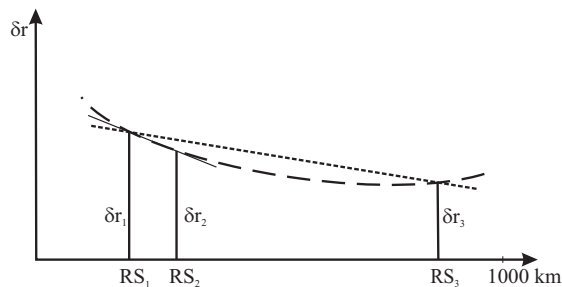


Abbildung 4.2: Lineare und quadratische Interpolationsfunktion

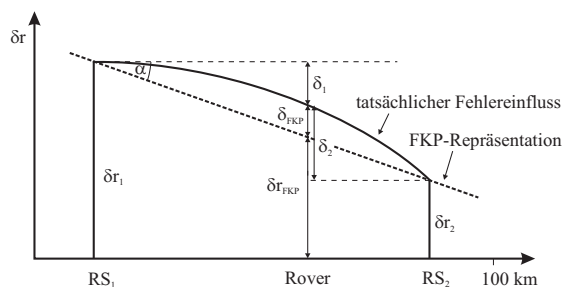


Abbildung 4.3: Interpolation entfernungsabhängiger Fehler (nach Wübbena et al. (2000))

Abhängig von der Näherungsposition  $(\varphi, \lambda)$  eines Nutzers werden Netzkorrekturen  $\delta r_{FKP}$  für die ionosphärische und für die geometrische Komponente berechnet (Abb. 4.3). Beide werden resubstituiert in Streckenresiduen für die L1- und L2-Beobachtungen:

$$\delta \hat{r}_1 = \delta \hat{r}_0 + \frac{f_2}{f_1} \delta \hat{r}_1 \quad (4.14)$$

$$\delta \hat{r}_2 = \delta \hat{r}_0 + \frac{f_1}{f_2} \delta \hat{r}_1 \quad (4.15)$$

Die aus den L1- bzw. L2-Trägerphasenbeobachtungen abgeleiteten Pseudostrecken  $R$  werden abschließend mit der Summe der Korrekturen verbessert:

$$\hat{R}_s^i = R_s - \delta \hat{r}_s \quad (4.16)$$

Für einen Empfänger, der mit Hilfe der Pseudostreckenkorrekturen  $\delta r_1$  der ersten Referenzstation  $RS_1$  seine Position differentiell bestimmt, ergibt sich aufgrund der entfernungsabhängigen Fehleranteile der Fehler  $\delta_1$  (Abb. 4.3), beziehungsweise für die Korrekturdaten  $\delta r_2$  der zweiten Referenzstation  $RS_2$  der Fehler  $\delta_2$ . Die Modellierung der entfernungsabhängigen Fehler durch bspw. ein lineares Flächenpolynom ermöglicht die Berechnung der Korrektur  $\delta r_{FKP}$  für die Näherungsposition des Rovers. Es verbleibt nur der viel kleinere Repräsentationsfehler  $\delta_{FKP}$  aus der Differenz zwischen dem tatsächlichen Fehlerverhalten und der FKP-Repräsentation der entfernungsabhängigen Fehleranteile. Die Abweichungen sind hauptsächlich auf unmodellerte nichtlineare Effekte der Ionosphäre zurückzuführen. Um diesen verbleibenden Repräsentationsfehler zu kompensieren, müssen Zweifrequenzempfänger eingesetzt werden.

Die in Abb. 4.3 dargestellten Residuen  $\delta r$  umfassen den gesamten Pseudostreckenfehler mit all seinen Anteilen. Sie können aber auch wie im zuvor beschriebenen FKP-Modell in einen ionosphärischen und einen geometrischen Anteil aufgespalten werden. Abb. 4.3 müsste dann entsprechend um eine zweite Interpolationsebene ergänzt werden.

#### 4.3.4.3 Beispiele für FKP

Die Abbildungen 4.4 bis 4.6 zeigen drei Beispiele für Flächenkorrekturparameter. In den Abbildungen 4.4 und Abb. 4.5 sind die zeitlichen Variationen der vier Netzkoeffizienten des Satelliten PRN 05 für einen sechsständigen Zeitraum zwischen 3–10 Uhr MESZ in Hannover dargestellt. Die beiden geometrischen Parameter des bilinearen Polynoms variieren in der Längen- und Breitenkomponente bis maximal  $\pm 1$  ppm, was die hohe Korrelation der Satellitenbahnen erkennen lässt. Für größere Elevationen beschreibt das FKP-Modell die troposphärischen Verzögerungen zuverlässig. Die Modellierung der ionosphärischen Verzögerung ist dagegen schwieriger. Nach dem Sonnenaufgang um ca. 6 Uhr variieren



die beiden ionosphärischen Parameter um bis zu  $\pm 6$  ppm innerhalb einer halben Stunde. Ohne die Verwendung von Flächenkorrekturparametern würde eine Nutzerposition in der entsprechenden Größenordnung verfälscht. Diese schnellen Variationen können auch nicht durch Standard- oder Globale Ionosphärenmodelle aufgefangen werden. Deutlich größere Variationen der ionosphärischen Koeffizienten von  $\pm 30$  ppm wurden dagegen in Brasilien registriert (Kap. 6).

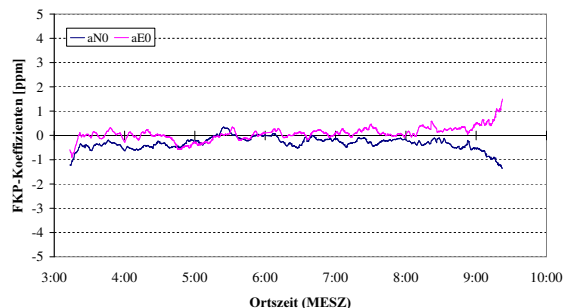


Abbildung 4.4: Zeitliche Variation der geometrischen Netzkoeffizienten

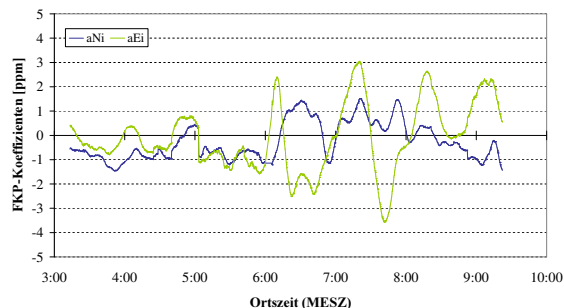


Abbildung 4.5: Zeitliche Variation der ionosphärischen Netzkoeffizienten

Die troposphärische Laufzeitverzögerung ist für Satelliten mit niedrigen Elevationen nur schwer zu modellieren. Die Restfehler bewirken den Anstieg der geometrischen Netzkoeffizienten von  $\pm 1$  ppm auf  $\pm 2$  ppm bei  $10^\circ$  Elevationwinkel (Abb. 4.6). Bei unverändertem Orbitfehler muss der Anstieg alleine auf troposphärische Einflüsse zurückzuführen sein. Dargestellt sind in Abb. 4.6 die Netzkoeffizienten für den Satelliten PRN 30 zwischen 9–11 Uhr MEZ. Bemerkenswert ist noch in beiden Abbildungen, dass kein durch Mehrwegeausbreitung verursachtes Signal die Netzkoeffizienten verfälscht. Die Mehrwegeausbreitung würde in Form von Korrelationen zwischen den geometrischen und den ionosphärischen Residuen auftreten.

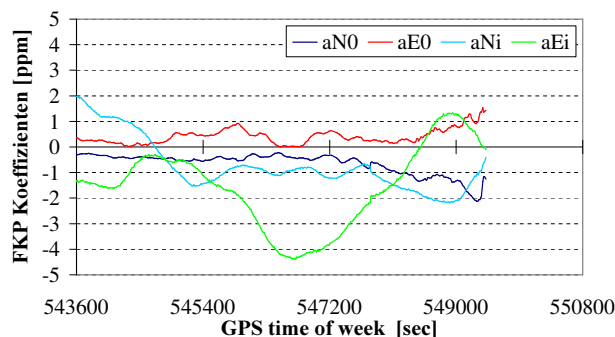


Abbildung 4.6: Netzkoeffizienten bei niedrigen Elevationen

### 4.3.5 Kollokationsmodell

#### 4.3.5.1 Einführung

Bei der Auswertung der Referenzstationsbeobachtungen können die hochgenau bekannten Positionen der Stationen als Information in die Ausgleichung eingeführt werden. Beruht die Auswertung auf differenzierten Beobachtungen, lässt sich nach Raquet, Lachapelle (2001) die Differenz zwischen den Doppeldifferenzresiduen

$$\Delta\nabla\Phi_{ab}^{xy} = (\Phi_a^x - \Phi_a^y) - (\Phi_b^x - \Phi_b^y) \quad (4.17)$$

und den aus den bekannten Stations- und Satellitenkoordinaten gerechneten Doppeldifferenzen bilden,

$$\Delta\nabla\bar{\Phi}_{ab}^{xy} = \Delta\nabla\Phi_{ab}^{xy} - \Delta\nabla r_{ab}^{xy} \quad (4.18)$$

die bei fehlerfreien Beobachtungen Null ergeben muss. Aufgrund der systematischen und zufälligen Fehler ist die Differenz  $\Delta\nabla\bar{\Phi}$  jedoch nicht Null, außerdem ist noch die ganzzahlige Doppeldifferenz-Mehrdeutigkeit  $N$  zu lösen.

$$\Delta\nabla\bar{\Phi}_{ab}^{xy} = \Delta\nabla I + \Delta\nabla T + \Delta\nabla\delta o + \Delta\nabla M + \Delta\nabla\varepsilon + \Delta\nabla N \quad (4.19)$$

Die Differenz zwischen der gemessenen und einer gerechneten Doppeldifferenzbeobachtung enthält Restfehler der Ionosphäre  $\Delta\nabla I$ , Troposphäre  $\Delta\nabla T$  und Satellitenbahn  $\Delta\nabla\delta o$ , die durch die Differenzbildung zwischen den Beobachtungsgleichungen nicht vollständig eliminiert wurden. Weiterhin sind mit der Mehrwegeausbreitung  $\Delta\nabla M$  und dem Messrauschen  $\Delta\nabla\varepsilon$  noch unkorrelierten Fehler enthalten, die durch die Differenzbildung noch verstärkt werden.

Die Gleichungen nach (4.19) werden in einer Ausgleichung bedingter Beobachtungen mit unbekanntem Parametern gelöst:

$$\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{C}_l \mathbf{B}^T (\mathbf{B} \mathbf{C}_l \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{w} \quad (4.20)$$

Nach diesem ersten Schritt bei der Vernetzung von Referenzstationen müssen in einem zweiten Schritt die differentiellen Fehler für einen Rover innerhalb des Netzes abgeschätzt werden. Diese Aufgabe kann wie in den beiden Abschnitten zuvor als ein Interpolationsproblem behandelt werden, das sich nur für die räumlich korrelierten Fehler lösen lässt, nicht für die stationsabhängigen und damit unkorrelierten Fehleranteile. Anstatt jedoch mit einem bestimmten Interpolationsansatz (z.B. lineare Interpolation) auch das Fehlerverhalten zu unterstellen, kann man das Fehlerverhalten aus den Beobachtungen im Netz durch die Bestimmung der räumlichen Korrelationen schätzen. Die ermittelten räumlichen Korrelationen werden dann genutzt, um durch Filterung und Prädiktion nach kleinsten Quadraten, auch als Kollokation bekannt, die differentiellen Fehler für den Rover zu bestimmen.

#### 4.3.5.2 Grundprinzip der Kollokation

Bei der Kollokation handelt es sich um eine Verallgemeinerung der Ausgleichungsrechnung, bei der ein funktionales Modell durch ein spezielles stochastisches Modell, das vorzugsweise die nachbarschaftliche Korrelation beschreibt, ergänzt wird (Höpcke 1980). Bei der Kollokation werden die nach Abzug der Trendfunktion verbleibenden Beobachtungsresiduen in den Stützpunkten in zwei zufällige Anteile, dem Signal und dem Rauschen, getrennt, was als Filterung bezeichnet wird. Die für einen Ort zwischen den Stützpunkten berechenbaren Werte der Trendfunktion werden um einen prädizierten Signalanteil verbessert. Entscheidend dafür ist die Signalkovarianzmatrix, deren Elemente mit Hilfe einer Korrelationsfunktion gebildet werden.

Die Kollokation ist besonderes in der Schwerefeldmodellierung ein weit verbreitetes Verfahren, da es die flexible Schätzung von Schwerefeldgrößen aus unterschiedlichen Schwerefeldbeobachtungen erlaubt (Torge 2003). Raquet (1998) hat das Verfahren auf die Referenzstationsvernetzung übertragen und in der Software NetAdjust für Postprocessing-Auswertungen realisiert. Bei diesem Verfahren lässt sich das prädizierte Signal  $\hat{\mathbf{s}}$  für einen zwischen den Referenzstationen befindlichen Rover berechnen, ohne dass Beobachtungen des Rovers vorliegen. Es wird mit Hilfe der Kovarianzmatrix  $\mathbf{C}_x$  der Beobachtungen und der Kreuzkovarianzmatrix  $\mathbf{C}_{s,x}$  zwischen dem Signal und den Beobachtungen geschätzt (Raquet, Lachapelle 2001):

$$\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{C}_{s,x} \mathbf{C}_x^{-1} \mathbf{x} \quad (4.21)$$

Der Nutzer muss auch keine Informationen an die Vernetzungszentrale senden. Damit ist das Verfahren für die Ausstrahlung von Korrekturen geeignet.

Die Korrekturen der Trägerphasenbeobachtungen der Referenzstation  $\delta\mathbf{l}$  und des Rovers  $\delta\mathbf{l}_r$  werden mittels der Prädiktion nach kleinsten Quadraten berechnet (Raquet 1998):

$$\delta\hat{\mathbf{l}}_r = \mathbf{C}_{\delta l_r, \delta l} \mathbf{B}^T (\mathbf{B} \mathbf{C}_{\delta l} \mathbf{B}^T)^{-1} (\mathbf{B} \bar{\Phi} - \lambda \Delta \nabla N) \quad (4.22)$$

$$\delta\hat{\mathbf{l}} = \mathbf{C}_{\delta l} \mathbf{B}^T (\mathbf{B} \mathbf{C}_{\delta l} \mathbf{B}^T)^{-1} (\mathbf{B} \bar{\Phi} - \lambda \Delta \nabla N) \quad (4.23)$$

mit  
 $\bar{\Phi} = \Phi - \rho$  Differenz gemessener ( $\Phi$ ) minus gerechneter ( $\rho$ ) Trägerphasenbeobachtungen  
 $\Delta \nabla N$  gelöste Doppeldifferenz-Mehrdeutigkeiten zwischen den Referenzstationen  
 $\lambda$  Trägerphasen-Wellenlänge  
 $\mathbf{B} = \frac{\partial \Delta \nabla \bar{\Phi}}{\partial \Phi}$  Matrix der Doppeldifferenzen (+1, 0, -1)  
 $\mathbf{C}_{\delta l}$  Kovarianzmatrix der Trägerphasenbeobachtungen der Referenzstation  
 $\mathbf{C}_{\delta l_r, \delta l}$  Kreuzkovarianzmatrix zwischen den Trägerphasenbeobachtungen der Referenzstation und des Rovers

Für die Gleichungen (4.22) und (4.23) gilt, dass die präzisen Koordinaten der Referenzstationen bekannt sein müssen. Die Doppeldifferenz-Mehrdeutigkeiten zwischen den Referenzstationen sind dabei als Integer-Werte zu lösen. Nur bei sehr weiten Stationsabständen sind Lösungen mit realwertigen Mehrdeutigkeiten einsetzbar, allerdings sinkt die Positionierungsgenauigkeit erheblich (Lachapelle et al. 2000). Weiterhin müssen die Kovarianzmatrizen  $\mathbf{C}_{\delta l}$  und  $\mathbf{C}_{\delta l_r, \delta l}$  zutreffend aufgestellt worden sein.

Mit den Korrekturen nach (4.22) und (4.23) werden zuerst die Beobachtungen des Referenz- bzw. Roverempfängers korrigiert. Die verbesserten Beobachtungen der Referenzstation würden bei einem Echtzeitverfahren dann zum Rover übertragen und dort die Basislinie durch eine Doppeldifferenzlösung berechnet.

Die Genauigkeit der Kovarianzmatrix begrenzt die Leistungsfähigkeit des NetAdjust-Ansatzes. Die Kovarianzmatrix wiederum beruht auf der Kovarianzfunktion, die das Verhalten der korrelierten und unkorrelierten Fehler innerhalb des Referenznetzes beschreibt. Raquet (1998) hat Kovarianzfunktionen nur für L1-Beobachtungen und die Widelane-Linearkombination aufgestellt und dabei alle entfernungsabhängigen Fehler gemeinsam modelliert, d.h. nicht zwischen ionosphärischen Fehlereinflüssen den geometrischen Fehlern aus Troposphäre und Orbit unterschieden.

Das von Raquet (1998) realisierte Verfahren ist nicht echtzeitfähig. Für seine Untersuchungen sowie weitere Untersuchungen der Arbeitsgruppe der University of Calgary wurden Beobachtungen mit 5- bzw. 15-sec-Rate aufgezeichnet und mit Bernese 4.2 unter Verwendung präziser IGS Orbits prozessiert.

### 4.3.5.3 Berechnung der Kovarianzmatrizen

Die Berechnung der in (4.21) und (4.22) bzw. (4.23) als bekannt vorausgesetzten Kovarianzmatrizen wird auf der Basis der ausführlicheren Darstellung von Fortes (2002) beschrieben.

Zwischen den Referenzstationen können die Doppeldifferenzresiduen  $\mathbf{B}_{\delta l}$  berechnet werden. Betrachtet man die  $\mathbf{B}_{\delta l}$  als Beobachtungen und die  $\delta\mathbf{l}_r$  als Signal mit jeweils dem Erwartungswert Null, können durch Anwendung der Kollokationsmethode die Fehler  $\delta\mathbf{l}_r$  für jede beliebige Roverposition im Referenzstationsnetz abgeschätzt werden.

Die Kovarianzmatrix der prädierten Signale berechnet sich nach der Gleichung (Moritz 1980)

$$\mathbf{C}_{\hat{s}\hat{s}} = \mathbf{C}_{ss} - \mathbf{C}_{sl} \mathbf{C}_{ll}^{-1} \mathbf{C}_{ls} \quad (4.24)$$

Zur Berechnung der Trägerphasenkorrekturen müssen die Kovarianzmatrizen  $\mathbf{C}_{\delta l}$  und  $\mathbf{C}_{\delta l_r}$  bekannt sein (Fortes 2002):

$$\mathbf{C}_{\delta \hat{l}_r} = \mathbf{C}_{\delta l_r} - \mathbf{C}_{\delta l_r, \delta l} \mathbf{B}^T (\mathbf{B} \mathbf{C}_{\delta l} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{B} \mathbf{C}_{\delta l_r, \delta l}^T \quad (4.25)$$

$$\mathbf{C}_{\delta \hat{l}} = \mathbf{C}_{\delta l} - \mathbf{C}_{\delta l} \mathbf{B}^T (\mathbf{B} \mathbf{C}_{\delta l} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{B} \mathbf{C}_{\delta l} \quad (4.26)$$

Dazu benötigt man Kovarianzfunktionen zur Beschreibung der korrelierten Fehler in Abhängigkeit der Satellitenelevation sowie die Varianzen der unkorrelierten Fehler (Mehrwegeausbreitung, Messrauschen),

$$\delta \mathbf{l} = \delta_c \mathbf{l}(p, p_0) + \delta_u \mathbf{l} \quad (4.27)$$

mit dem Term  $\delta_c \mathbf{l}(p, p_0)$  für die korrelierten Fehler als Funktion des Ortes der Referenzstation  $p_0$  und des Rovers  $p$  sowie dem Term  $\delta_u \mathbf{l}$ , der den unkorrelierten Fehleranteilen entspricht.

Die korrelierten Fehler lassen sich mit der differentiellen Varianzfunktion  $\sigma_{c_z}^2(p_m, p_n)$  zwischen den beiden Punkten  $m$  und  $n$  wie folgt funktional beschreiben (Fortes 2002):

$$\sigma_{c_z}^2(p_m, p_n) = k_1 d + k_2 d^2 \quad (4.28)$$

Darin sind der Abstand  $d$  zwischen  $m$  und  $n$  sowie die beiden Koeffizienten  $k_1$  und  $k_2$  zu bestimmen.

Die unkorrelierten Fehler werden durch den Parameter  $\sigma_{u_z}^2(a)$ , d.h. durch eine Konstante beschrieben, die nur für die jeweilige Station gilt.

Um die für Zenitbeobachtungen berechneten Fehler auf beliebige Elevationen umrechnen zu können, wird die Mapping-Funktion (4.29) mit dem vorab zu bestimmenden Koeffizienten  $k_\mu$  verwendet (Fortes 2002).

$$\mu(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \varepsilon} + k_\mu \left( 0.53 - \frac{\varepsilon}{180^\circ} \right) \quad (4.29)$$

Die Kovarianzfunktion wird aus realen Beobachtungen wie folgt berechnet:

1. Für jede mögliche Basislinie im Netz wird der Koeffizient  $k_\mu$  der Mapping-Funktion (4.29) berechnet
  - (a) Aus der Berechnung der Differenz zwischen der gemessenen und der gerechneten Doppeldifferenz-Trägerphasenbeobachtung bei gelöster Mehrdeutigkeit folgt die Korrektur der Referenzstations-Trägerphasenbeobachtung ( $\Delta \nabla \delta l$ )
  - (b) Klassenbildung der  $\Delta \nabla \delta l$  in Abhängigkeit der Elevation des niedrigeren Satelliten
  - (c) Berechnung der Varianz jeder Klasse
  - (d) Berechnung von Nominalwerten für die ionosphärische und troposphärische Mapping-Funktion
  - (e) Ableitung des Funktionswertes  $\mu(\varepsilon)$  der Mapping-Funktion
2. Berechnung der Parameter  $k_1, k_2$  und  $\sigma_{u_z}^2$ 
  - (a) Skalierung der  $\Delta \nabla \delta l$  auf den Zenit
  - (b) Berechnung der Varianz  $\Delta \nabla \delta l_{abc}^{xy}$  für jede Basislinie im Netz
  - (c) Berechnung der Parameter  $k_1, k_2$  und  $\sigma_{u_z}^2$  mit folgendem Ausgleichungsmodell und den Varianzen  $\Delta \nabla \delta l_{abc}^{xy}$  als Beobachtungen

$$E\{(\Delta \nabla \delta l_{abc}^{xy})^2\} = 2(k_1 d_{ab} + k_2 d_{ab}^2) + 2\sigma_{u_z}^2(a) + 2\sigma_{u_z}^2(b) \quad (4.30)$$

#### 4.3.5.4 Weiterentwicklungen des Kollokationsmodells

Die Weiterentwicklung des Kollokationsansatzes war das Ziel der Untersuchungen von Fortes (2002). Zunächst hat er die von Raquet berechneten Kovarianzfunktionen mit neuen Datensätzen vom St. Lawrence Netz (1998) und einem Netz in Brasilien (1999) neu bestimmt. Die in der Kovarianzfunktion zuvor gemeinsam modellierten Fehler hat er in zwei Komponenten getrennt, einem geometrischen und einem ionosphärischen Anteil. Abschließend hat Fortes eine Filterung der Korrekturen ansatzweise untersucht.

Da die Kovarianzfunktionen nicht aus aktuellen Beobachtungen abgeleitet und sofort zur Echtzeitvernetzung eingesetzt werden können, stellt sich die Frage, wie universell eine einmal ermittelte Kovarianzfunktion auf Beobachtungen in demselben Netz zu einem späteren Zeitpunkt oder gar in einem anderen Netz angewendet werden kann. Dazu führte Fortes (2002) zwei Neuberechnungen der Kovarianzfunktion durch. Im Gebiet des St. Lawrence Netzes ergab sich mit der neuen Funktion keine Verbesserungen gegenüber der schon zu einem früheren Zeitpunkt in diesem Netz bestimmten Funktion. Im Brasilianischen Netz, für das zuvor keine im gleichen Gebiet abgeleitete Kovarianzfunktion zur Verfügung stand, brachte die Berechnung einer neuen, auf das Gebiet abgestimmten Funktion eine Verbesserung um rund 9% in L1 und 14% in der Widelane. Insgesamt betrachtet ist die Methode nicht sehr sensitiv gegenüber der verwendeten Kovarianzfunktion. (Fortes 2002) empfiehlt, die Kovarianzfunktion aus Beobachtungen in dem Netz abzuleiten, in dem ein Positionierungsservice angeboten werden soll. Ob allerdings eine Neuberechnung der Kovarianzfunktion im Minimum und im Maximum sowie in der Mitte eines Sonnenzyklus ausreichend ist, muss in Frage gestellt werden.

Ein zweiter wesentlicher Teil der Untersuchungen war die Berechnung zweier getrennter Kovarianzfunktionen für den geometrischen und ionosphärischen Fehleranteil durch Nutzung der ionosphärenfreien bzw. geometriefreien Linearkombination. Die ionosphärischen Fehler wurden zusätzlich in ihre Nord-Süd und West-Ost-Komponenten aufgespalten, weil insbesondere bei den Untersuchungen in Brasilien unterschiedliche Fehlerverhalten in den beiden Achsen zu erwarten waren. Diese Untersuchungen brachten wiederum für beide Netze keine nennenswerten Verbesserungen gegenüber der ursprünglichen Kovarianzfunktion. Eine geringfügige Verbesserung ergab sich wieder nur dann, wenn die Daten der Messkampagne zur Neuberechnung der Kovarianzfunktion verwendet wurden.

#### 4.3.5.5 Echtzeitimplementierung des Kollokationsmodells

Das von Raquet (1998) mit NetAdjust realisierte Kollokationsmodell wurde durch Integration eines schnellen Mehrdeutigkeitslösungsalgorithmus (network ambiguity resolution (NetAR)) (Sun et al. 1999) und zahlreicher Echtzeitkomponenten (Townsend et al. 1999) in eine als MultiRef-Methode bezeichnete echtzeitfähige Version weiterentwickelt. Die von Hitec, Norwegen (vormals Kvaerner Ship Automation) und Robertson Enterprise, Calgary, realisierte Echtzeitimplementierung korrigiert direkt die Beobachtungen einer Referenzstation (Townsend et al. 1999). Dazu werden die Rohdaten der Referenzstationen per Telefon zu einem Kontrollzentrum übertragen. Dort werden die Vernetzungskorrekturen für die Referenzstationen nach dem Kollokationsansatz berechnet und zu den Referenzstationen zurückübertragen. Die um die Vernetzungskorrekturen verbesserten Rohdaten werden anschließend per Funk ausgestrahlt. Auf die Übertragung differentieller Korrekturen wird dabei verzichtet. Auf der Nutzerseite erfolgt die Mehrdeutigkeits- und Positionsbestimmung mit Standard-RTK-Software als Doppeldifferenzlösung in Bezug auf nur eine Referenzstation. Diese Vorgehensweise ist nicht RTCM-konform. Wegen der epochenweisen Übertragung von Rohdaten erfordert das Verfahren eine hohe Datenübertragungsrate.

Eine Erweiterung des Verfahrens sieht vor, zusätzlich zu den verbesserten Rohdaten der Referenzstationen noch Korrekturen für gitterförmig angeordnete Berechnungspunkte zu generieren. Die Daten der Berechnungspunkte werden aus der Kovarianzfunktion des Kollokationsmodells abgeleitet. Für diese,

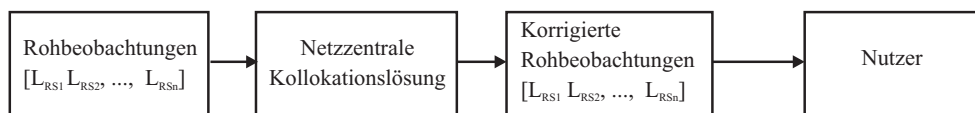


Abbildung 4.7: Übertragung korrigierter Rohbeobachtungen in MultiRef

im nachfolgenden Abschnitt ausführlicher beschriebene Vorgehensweise haben (Townsend et al. 2000) eine entsprechende Definition eines RTCM-Nachrichtentyps vorgeschlagen.

#### 4.3.5.6 Virtuelles Referenzstationsgitter

Eine Alternative zu den Korrekturfunktionen ist ein Korrekturgitter. Für regelmäßig verteilte Gitterpunkte innerhalb eines Referenznetzes werden synthetische Referenzstationsbeobachtungen aus dem Kollokationsansatz nach der in Kap. 4.3.5.5 beschriebenen Vorgehensweise generiert. Die Beobachtungsdaten werden im Broadcastverfahren ausgestrahlt, eine Zwei-Wege-Kommunikation ist nicht erforderlich. Die Nutzer schließen sich an die jeweils im nächstgelegenen Gitterpunkt erzeugte Virtuelle Referenzstation an. Verändert der Rover seine Position, kann er problemlos von einer Virtuellen Referenzstation zur nächsten wechseln. Sprünge sind bei dem Wechsel nicht zu erwarten, da die Korrekturdaten aller VRS-Gitterpunkte aus einer Kovarianzfunktion abgeleitet wurden. Eine Nachführung der Referenzstationsposition ist nicht notwendig. Nachteilig ist der hohe Aufwand zur Berechnung aller Gitterpunkte und die Ausstrahlung entsprechend vieler Korrekturdatenströme. Sobald es aber mehr in der Fläche verteilte Nutzer gibt als Gitterpunkte, sinkt der Berechnungsaufwand unter den Aufwand für die individuellen Virtuellen Referenzstationen, die in Kap. 4.3.6 behandelt werden.

Townsend et al. (2000) haben auf der Grundlage der Implementierung in der MultiRef-Software einen Vorschlag veröffentlicht, wie die Daten eines Virtuellen Referenzstationsgitters in einem standardisierten RTCM-Nachrichtentyp integriert werden können. Die Nachrichten sollen kompakt sein und die Einweg-Kommunikation (Broadcast) unterstützen. Es soll keine strengen Anforderungen an die räumliche Verteilung der Referenzstationen, d.h. der Gitterstruktur, geben. Die Korrekturdatenberechnung soll für jeden einzelnen Satelliten erfolgen. Abhängig von den atmosphärischen Bedingungen und der Leistung der Referenzstationempfänger sollen Qualitätsindikatoren für die Korrekturen mit übertragen werden, ebenso Integritätsinformationen über den Systemzustand. Weiterhin soll der Standard die Möglichkeit offen lassen, die Korrektur als einen kombinierten Wert anzuwenden oder in die Fehlerkomponenten zu separieren.

Es werden zwei Nachrichtentypen unterschieden. In einer Nachricht werden die Definitionsparameter des Gitters übertragen (Grid Definition Message), in der anderen die Korrekturen eines Beobachtungstyps für einen Satelliten (Correction Message). Die eigentlichen Korrekturdaten müssen häufiger übertragen werden als Definitionsparameter, die sich nur selten ändern. Die Definitionsparameter werden nur für die das Gitter bildenden präzidierten Berechnungspunkte (correction computation points) ausgestrahlt, nicht für die unregelmäßig angeordneten Referenzstationen (computation points). Um die zu übertragende Datenmenge zu reduzieren, wird die Anordnung als regelmäßiges Gitter ausgenutzt, indem vom Südwestlichen Eckpunkt ausgehend die Anzahl der Stationen in West-Ost Richtung, die Punktabstände in nördlicher bzw. östlicher Richtung sowie eine ID-Nummer übertragen werden (Abb. 4.8).

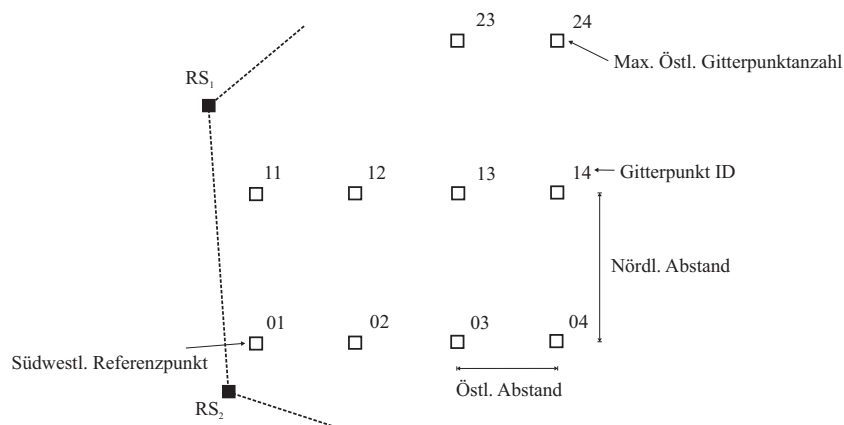


Abbildung 4.8: Definitionsparameter des Virtuellen Referenzstationsgitters (nach Townsend et al. 2000)

### 4.3.6 Virtuelle Referenzstation (VRS)

#### 4.3.6.1 Einleitung

Eine Virtuelle Referenzstation (VRS) besteht aus einer Position und synthetisch generierten Beobachtungsdaten für diesen Punkt. Diese virtuellen Beobachtungen werden aus realen Beobachtungen in einem Referenzstationsnetz berechnet, indem die entfernungsabhängigen Fehler in einer Multistationslösung geschätzt, Korrekturen für den Ort der VRS abgeleitet und an den virtuellen Beobachtungen angebracht werden. Schließt sich ein Nutzer an die nahegelegene VRS an, kann er über kurze Basislinien eine schnelle und präzise Trägerphasenlösung mit Standardauswertesoftware rechnen (Abb. 4.9). Die VRS-Beobachtungen werden für eine Näherungsposition berechnet, die der Codelösung des Roverempfängers entnommen ist. Eine zwischengeschaltete DGPS-Lösung kann die Position der VRS auf bis zu einem Meter an die tatsächliche Roverposition annähern. Der Nutzer muss die Näherungsposition der Netzzentrale übermitteln, was eine Zweiwegekommunikation erforderlich macht. Überschreitet der Rover den für RTK-Messungen üblichen Entfernungsbereiches zur VRS, sollten Beobachtungen für eine neue VRS generiert werden.

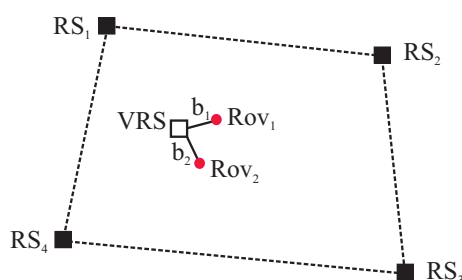


Abbildung 4.9: Positionierung eines Rovers über eine Virtuelle Referenzstation (VRS) in einem Referenzstationsnetz

Das Konzept der virtuellen Referenzstation (VRS) wird erstmals von Weber, Tiwari (1995) für ein Code-basiertes WADGPS vorgestellt. Nach der auf Webster, Kleusberg (1992) zurückgehenden regionalen Modellierung differentieller ionosphärischer Fehler entwickelt Wanninger (1996a,b) das VRS-Verfahren für die präzise, trägerphasenbasierte Positionierung weiter und veröffentlicht es erstmals 1997 (Wanninger 1997). Seine zahlreichen Untersuchungen auf diesem Gebiet münden in der Habilitationsschrift (Wanninger 2000). Parallel dazu wird für das niederländische aktive GPS-Referenzstationsnetz

(AGRS.NL) ein VRS-Konzept entwickelt (van der Marel 1998), das auf der Verarbeitung undifferenzierter Beobachtungen basiert (de Jonge 1998). Im Rahmen einer WADGPS-Studie für das Automated GPS-Network Switzerland (AGNES) wurde auch BERNESE für die Generierung von VRS-Beobachtungen erweitert (Beutler et al. 1999). Alle genannten VRS-Entwicklungen dienen ausschließlich für präzise Postprocessing-Anwendungen in aktiven GPS-Netzen. Die VRS erleichtern dabei Nutzern den Anschluss an das Referenznetz, weil nicht mehr die Daten aller umliegenden Referenzstationen abgerufen und prozessiert werden müssen. Echtzeitfähige Realisierungen des VRS-Konzeptes werden im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

Das Verfahren der Virtuellen Referenzstation ist auf zwei verschiedenen Wegen realisierbar. Die VRS-Beobachtungen können entweder zentral in einem Rechenzentrum des Netzbetreibers generiert oder dezentral vom Nutzer selbst berechnet werden (Wanninger 2000). Die zentrale Lösung erfordert die Übertragung der Näherungsposition des Nutzers an die Zentrale, die daraufhin die VRS-Daten berechnet und zurücksendet, was ein Zweiwegekommunikationsmedium wie z.B. Mobilfunk voraussetzt. Bei der dezentralen Lösung empfängt der Nutzer den Beobachtungsdatensatz einer Referenzstation einschließlich dem Korrekturmodell für die Region und berechnet die VRS-Beobachtungen für seine Näherungsposition selbst. Dafür benötigt der Nutzer eine spezielle VRS-Software, eine Standard-RTK-Software ist nicht mehr ausreichend. Dem geringeren Berechnungsaufwand auf Seiten des Systembetreibers steht der etwas höhere Datenübertragungsaufwand und der größere Rechenaufwand auf Nutzerseite gegenüber. Während bei der zentralen Lösung die Zahl der Nutzer durch die verfügbare Rechenkapazität und die Anzahl der Kommunikationskanäle begrenzt ist, ist die dezentrale Lösung grundsätzlich als Broadcastverfahren realisierbar und damit für beliebig viele Nutzer verfügbar.

Die virtuellen Beobachtungen werden in einem der beiden Standarddatenformate RTCM oder RINEX zum Nutzer übertragen. Bei der Postprocessing-Anwendung werden RINEX-Dateien erzeugt, bei der Echtzeitpositionierung ein RTCM-Datenstrom. Zu beachten ist, dass virtuelle Daten bislang in beiden Standards nicht vorgesehen und für einen Nutzer daher nicht von realen Daten zu unterscheiden sind. Strenggenommen sind Korrekturen der zu übertragenden Daten unzulässig, was jedoch in Bezug auf die Uhren im RINEX-Standard nicht konsequent gehandhabt wird und auch bei Antennenphasenzentrums-korrekturen nicht unproblematisch ist. Darüber hinaus besteht keine Möglichkeit, Zusatzinformationen z.B. über die Integrität oder Qualität des Positionierungsdienstes zu übermitteln. Problematischer als die Wahrung des Standards ist für einen Nutzer jedoch, dass die Auswertesoftware nicht erkennen kann, dass sie entfernungskorrigierte Referenzstationsbeobachtungen verarbeitet. Dies führt zur Auswahl nicht optimaler Auswertestrategien.

#### 4.3.6.2 Berechnung virtueller Referenzstationsbeobachtungen

Die synthetischen Beobachtungen einer Virtuellen Referenzstation werden, der grundsätzlichen Vorgehensweise von Wanninger (2000) und Beutler et al. (1999) folgend, in mehreren Schritten generiert. Für jede als voneinander unabhängig betrachtete Epoche erfolgt zuerst die Reduktion der undifferenzierten Zweifrequenz-Trägerphasenbeobachtungen  $\Phi$  der Referenzstationen um die geometrische Entfernung  $R_a^i$  zwischen den Satelliten und dem Empfänger. An den so erhaltenen Beobachtungskorrekturen werden Antennenphasenzentrumskorrekturen  $A$  angebracht, wenn unterschiedliche Antennentypen im Einsatz sind. Eine troposphärische Korrektur  $T$  nach einem Standardmodell wird berücksichtigt, um die troposphärischen Restfehler flächenhaft modellieren zu können.

$$r_1 = \Phi_a^i - (R_a^i + A + T) \quad (4.31)$$

Daran schließt sich, basierend auf den zuvor berechneten Beobachtungsresiduen  $r_1$ , die Lösung der Trägerphasenmehrdeutigkeiten  $N$  zwischen den Referenzstationen an. Beobachtungsgleichungen mit gelösten Doppeldifferenz-Mehrdeutigkeiten fließen in die Modellierung der entfernungs- und richtungsabhängigen Fehler ein. Die Modellparameter der ionosphärischen und geometrischen Fehlereinflüsse



werden getrennt voneinander epochenweise als lineare Funktion der Stationskoordinaten  $(\varphi, \lambda)$  geschätzt. Die Höhenkomponente bleibt unberücksichtigt. Mit Hilfe einer troposphärischen Mapping-Funktion werden ggf. die Bahn- und Troposphärenrestfehler getrennt modelliert. Abschließend werden die Parameter einer ausgleichenden Interpolationsebene ((4.32) und (4.33)) durch die verbleibenden Doppeldifferenz-Residuen der ionosphärenfreien und geometriefreien Linearkombinationen durch die Referenzstationen geschätzt.

$$\nabla \Delta r_{AB,I}^{ij} = a_{I,\Delta\varphi}^j \Delta\varphi_{AB} + a_{I,\Delta\lambda}^j \Delta\lambda_{AB} \quad (4.32)$$

$$\nabla \Delta r_{AB,0}^{ij} = a_{0,\Delta\varphi}^j \Delta\varphi_{AB} + a_{0,\Delta\lambda}^j \Delta\lambda_{AB} \quad (4.33)$$

Mit diesem Korrekturmodell werden die Residuen der Referenzstationen verbessert und man erhält Beobachtungsresiduen  $r_2$ . Bis auf Empfängeruhrfehler, stationsabhängige Fehler und Restfehler des Korrekturmodells sind sie für Beobachtungen zur gleichen Epoche und zum gleichen Satelliten identisch.

$$r_2 = f(r_1, N, \nabla \Delta r_I, \nabla \Delta r_0) \quad (4.34)$$

Der in (4.34) noch enthaltene Empfängeruhrfehler wird eliminiert, indem ein von allen Referenzstationen beobachteter Satellit als Basissatellit festgelegt wird und alle Beobachtungen um den abgeleiteten Empfängeruhrfehler reduziert werden. Die verbleibenden Doppeldifferenzresiduen  $r_3$  stellen zugleich die an den VRS-Daten anzubringenden Trägerphasenkorrekturen  $\Delta\Phi_{RS}^S(t)$  dar.

$$\Delta\Phi_{RS}^S(t) = \nabla \Delta r_3 \quad (4.35)$$

Die synthetischen Beobachtungen der VRS können für eine beliebige Näherungsposition des Rovers generiert werden. Damit die Algorithmen des Rovers eine normale Basislinien-Auswertung durchführen können, müssen diese Beobachtungen äquivalent zu realen Beobachtungen sein. Dies macht eine geometrische Verschiebung der Referenzstationsbeobachtungen auf die VRS-Position notwendig, indem alle auf die Referenzstation bezogenen Terme der Beobachtungsgleichung durch die VRS-Position ersetzt werden. Zu berücksichtigen ist dabei die während der Signallaufzeit rotierende Erde, in Verbindung mit der sich ändernden Signallaufzeit durch Verlegung der Empfängerposition. Weiterhin müssen für die VRS-Position prädierte atmosphärische Fehleranteile hinzuaddiert werden, um die realen Verhältnisse abzubilden. Das atmosphärische Korrekturmodell umfasst sowohl ionosphärische als auch troposphärische Laufzeitverzögerungen. Auch Phasenzentrumsvariationen müssen in einer der drei folgenden Formen berücksichtigt werden (RTCM 2001):

- Teilt der Nutzer neben seiner Näherungsposition auch seinen Antennentyp mit, kann der Referenznetzbetreiber zu den synthetischen Beobachtungen die PCV-Parameter des entsprechenden Antennentyps addieren. Bei der Basislinien-Auswertung des Nutzers werden die gemeinsamen Antennenfehler eliminiert.
- Die synthetischen Beobachtungen werden grundsätzlich für eine Nullantenne berechnet. Die Nutzer-Software muss die absoluten PCV der eigenen Antenne kennen und die eigenen Beobachtungen ebenfalls auf eine Nullantenne reduzieren.
- Die gegenwärtig vom RTCM-Komitee bevorzugte Lösung sieht die Berechnung synthetischer Beobachtungen für einen standardisierten Antennentyp vor, wie er z.B. im IGS angewendet wird. Die Software des Nutzers muss über die notwendigen Kalibrierdaten sowohl der eigenen Antenne als auch über die der Virtuellen Referenzstationsantenne verfügen.

Für Codebeobachtungen vereinfachen sich die Berechnungen erheblich, da keine Mehrdeutigkeitslösung notwendig ist und die Parameter des Korrekturmodells der Trägerphasenbeobachtungen übernommen werden können. Die berechneten Code- und Trägerphasenbeobachtungen werden abschließend im RINEX-Format in eine Datei geschrieben oder in RTCM-Korrekturdaten umgewandelt und zum Nutzer übertragen.

### 4.3.6.3 Echtzeitpositionierung mittels Virtueller Referenzstationen

Die zuvor genannten Realisierungen des VRS-Verfahrens von Wanninger (1997), van der Marel (1998) oder Beutler et al. (1999) beschränken sich auf Postprocessing-Lösungen in aktiven Referenznetzen. Sie vereinfachen die GPS-Auswertung für einen Nutzer erheblich, der nur einen Datensatz einer virtuellen Referenzstation benötigt. Ein solcher Datensatz kann per Mobilfunk unmittelbar nach den im üblichen rapid-static-Modus durchgeführten Messungen im Feld heruntergeladen werden. In einer near-real-time-Auswertung werden die VRS-Beobachtungen mit den eigenen GPS-Beobachtungen im Feld postprozessiert. Diese Auswertung über eine einzelne kurze Basislinie ist mit Standardsoftware möglich, im Gegensatz zu den wesentlich aufwendigeren Netzlösungen mit deutlich größeren Stationsabständen.

Die Echtzeitpositionierung mittels virtueller Referenzstationen erfordert einen wesentlich höheren technischen Aufwand für die Datenkommunikation im Referenznetz und zum Nutzer und für das Generieren der virtuellen Beobachtungen ohne wesentliche zeitliche Verzögerung. Auf die technischen Schwierigkeiten bei der Realisierung der VRS in Echtzeit gehen Hu et al. (2003) ein. Eine Echtzeitlösung wurde seit 1998 von der Firma terrasat, jetzt Trimble, mit der Software GPSNet entwickelt (Landau 1998). Wenngleich inzwischen weitere Firmen echtzeitfähige VRS-Software anbieten, wird weltweit das VRS-Verfahren fast ausschließlich mit der Trimble-Firmenlösung verbunden, wie der XXII. FIG-Kongress in Washington 2002 in einer eigens dafür eingerichteten Session gezeigt hat. Alle dort präsentierten Anwendungen, sowohl von Hochschulen wie von Landesvermessungsbehörden, beruhen bezüglich Hardware, Software und Konzept ausschließlich auf der Firmenlösung.

Nach den ursprünglichen Veröffentlichungen von Vollath et al. (2000a,b), Large et al. (2001) basiert die Trimble terrasat-Lösung auf der Parameterelimination. Die entfernungsabhängigen Fehler werden durch ein zweidimensionales Flächenpolynom für die zenitalen ionosphärischen Laufzeitverzögerungen und die troposphärischen Laufzeitverzögerungen durch einen Maßstabsparameter je Referenzstation modelliert. Weiterhin werden präzidierte IGS-Ephemeriden genutzt. Zur Interpolation der entfernungsabhängigen Fehler werden Dreiecke zwischen den Referenzstationen gebildet und die Fehler mit einem linearen zweidimensionalen Polynomansatz innerhalb der Dreiecksmasche interpoliert. Unter Berücksichtigung der flächenhaft interpolierten Korrekturwerte werden die virtuellen Beobachtungen für die VRS-Position generiert.

Demgegenüber verweisen Landau et al. (2003a) erstmals explizit darauf, dass auch die Vernetzungssoftware GPSNet undifferenzierte Beobachtungen in einem Multistationsansatz verarbeitet, mit vollständiger Modellbildung für die entfernungsabhängigen Fehler. Ein orthogonaler dezentralisierter Kalman-Filter wird als Kern der Vernetzungslösung beschrieben, aus dessen Zustandsvektor die VRS-Daten als eine von mehreren möglichen Repräsentationsformen abgeleitet werden.

Die mit Hilfe von VRS berechneten Lösungen liegen in dem Datum vor, in dem auch die Referenzstationen koordiniert sind. Dies ist in Brasilien das ITRF 2000, in Deutschland das ETRF 89. Für die meisten Anwendungen müssen die Lösungen jedoch noch in das jeweilige Landesvermessungssystem transformiert werden, d.h. in Brasilien in das South American Datum SAD 69 und in Niedersachsen in das amtliche Bezugssystem LS 100. Die mit dem Datumsübergang verbundenen Transformationen werden im Kap. 6.6.4 behandelt. An dieser Stelle sei jedoch auf die Möglichkeit hingewiesen, bereits die VRS-Beobachtungen in das jeweilige lokale Bezugssystem zu transformieren, so dass sich alle Lösungen in Bezug auf diese VRS bereits im Landesvermessungssystem befinden. Ein Beispiel für diese Vorgehensweise zeigen Townsend, Jensen (2001) für Dänemark auf, das durch extreme Abweichungen der lokalen Datumparameter von einem globalen System betroffen ist. Nach dem RTCM-Standard ist die unmittelbare Transformation der Korrekturdaten allerdings nicht vorgesehen, Datumsübergänge werden vorzugsweise durch die Übertragung von Transformationsparameter realisiert.

#### 4.3.6.4 Kinematische Lösungen mit VRS

Das Grundprinzip der VRS basiert auf der räumlichen Nähe zwischen der Virtuellen Referenzstation und dem GPS-Empfänger des Nutzers, der sich mit Hilfe seiner RTK-Standardsoftware über eine kurze Basislinie positionieren kann. Dies setzt grundsätzlich statische oder kinematische Beobachtungen im nahen Umfeld der VRS voraus. Problematisch wird es, wenn sich der Rover von der VRS entfernt, beispielsweise bei der Vermessung einer langgestreckten Anlage oder bei der Fahrzeugnavigation und -ortung. Eine ständige Nachführung der VRS ist wegen des hohen rechentechnischen Aufwandes für die Netzzentrale kaum möglich. Außerdem setzt RTK-Standardsoftware immer eine stationäre Basisstation voraus. Geänderte Koordinaten der Basisstation würden eine Reinitialisierung der Mehrdeutigkeiten auslösen. Alternativ ist die Bereitstellung eines mehr oder weniger regelmäßigen Gitters Virtueller Referenzstationen (Kap. 4.3.5.6) denkbar. Der in Bewegung befindliche Rover wird dabei immer an die nächstgelegene reale oder virtuelle Referenzstation angeschlossen, seine Trajektorie abschnittsweise ausgewertet.

Wanninger (2002b) hat mit der semikinematischen VRS eine dritte Alternative entwickelt. Dabei bleiben die Koordinaten der VRS unverändert, während die flächenbezogenen Korrekturen ständig für die aktuelle Roverposition angepasst werden. Dazu ist die kontinuierliche Übertragung der Näherungsposition des Rovers über eine permanente Zweiwege-Kommunikation zwischen dem Nutzer und der Netzzentrale erforderlich. Um die nach Anwendung des Flächenkorrekturmodells verbleibenden entfernungsabhängigen Restfehler zu minimieren, ist es sinnvoll, für die VRS eine Näherungsposition im Schwerpunkt des Messgebietes auszuwählen. Gegenüber statischen VRS und dem Anschluss an die nächstgelegene reale Referenzstation hat die semikinematische VRS den Vorteil, dass die differentiellen ionosphärischen Fehler stärker reduziert werden und eine kontinuierliche Auswertung der Trajektorie möglich ist.

#### 4.3.6.5 VRS-Positionierung von LEOs

Eine interessante Anwendung der Methode der Virtuellen Referenzstation eröffnet sich zur Positionsbestimmung von Low Earth Orbitern (LEO) in einem globalen Referenzstationsnetz (Beutler et al. 1999). Die VRS wird dabei, rechnerisch um alle atmosphärischen Einflüssen reduziert, im Geozentrum angeordnet. Ausgehend vom globalen Referenznetz können für jede Epoche virtuelle Beobachtungen zu allen GPS- und GLONASS-Satelliten generiert werden, mit der Doppeldifferenz der ionosphärenfreien Linearkombination  $L_0$  als Messgröße. Deren Auswertung in einer Float-Lösung lässt Positionierungsgenauigkeiten im dm-Bereich erwarten.

Dieses Verfahren erfordert eine akkurate Modellierung der Atmosphäre und wegen der Bildung von Zero-Differenzen auch eine gute Uhrmodellierung. Damit wird das Verfahren, auf der Ebene von Doppeldifferenzen, zu einer Alternative der Präzisen Einzelpunktbestimmung (Zumberge et al. 1997, Muellerschoen et al. 2001), deren Grundprinzip im nachfolgenden Abschnitt erläutert wird.

### 4.4 Präzise Einzelpunktbestimmung

#### 4.4.1 Grundprinzip

Ein Korrekturverfahren, das im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Vernetzungslösungen keinen direkten Anschluss an Referenzstationen erfordert, ist die präzise Einzelpunktbestimmung (Precise Point Positioning (PPP)). Es leitet sich ab aus dem Grundprinzip globaler Satellitennavigationssysteme, aus Codebeobachtungen zu mindestens vier Satelliten und ergänzenden Informationen aus der Broadcast Message die Position eines Empfängers in Echtzeit berechnen zu können. Die Parameter der Broadcast

Message werden vom GPS-Systembetreiber aus den Beobachtungen der weltweit verteilten Monitorstationen geschätzt und mit den GPS-Signalen ausgestrahlt (Kap. 2). Zu den wichtigsten Parametern gehören die Bahnen der Satelliten sowie Abweichungen der Satellitenuhren von der GPS-Systemzeit.

Die Genauigkeit einer Einzelstationslösung (Single Point Positioning (SPP)) hängt im wesentlichen vom verwendeten Codesignal ab, von der Genauigkeit der Bahn- und Uhrparameter sowie von der ionosphärischen Laufzeitkorrektur. Auf der Basis von C/A-Code Beobachtungen ist im Standard Positioning Service (SPS) eine horizontale Genauigkeit von  $\leq 13$  m und eine vertikale Genauigkeit von  $\leq 22$  m erreichbar (GPS-SPS-PS 2001), wenn die Systemsicherungstechnik Selective Availability (SA) nicht aktiviert ist. Mit den genaueren und robusteren P-Codes ermöglicht der Precise Positioning Service (PPS), der allerdings nur militärischen und anderen autorisierten Nutzern zur Verfügung steht, Genauigkeiten von 5–10 m in allen drei Koordinatenkomponenten.

Die präzise Einzelpunktbestimmung unterscheidet sich von der einfachen Einzelstationslösung darin, dass zuvor in einem globalen Referenzstationsnetz geschätzte präzise Parameter der Satellitenbahnen und -uhren in die Postprocessingauswertung eingeführt werden. Gegenüber den Parametern der Broadcast Message können diese als nahezu fehlerfrei betrachtet werden. Abhängig vom verbleibenden Coderauschen und dem ionosphärischen Fehlereinfluss kann die Genauigkeit der Codelösungen in den Submeterbereich gesteigert werden.

Mit den präzisen Bahn- und Uhrparametern ist auch die Korrektur von Trägerphasenmessungen möglich, wobei Zweifrequenzbeobachtungen zur Berechnung der ionosphärenfreien Linearkombination  $L_0$  vorausgesetzt werden. Die Mehrdeutigkeitsterme lassen sich bei dieser Vorgehensweise jedoch nicht auf ganzzahlige Werte festsetzen. Bei mehrstündigen Beobachtungen sind aber auch mit float-Lösungen Genauigkeiten von bis zu einem Zentimeter möglich, weshalb sich das Precise Point Positioning (Zumberge et al. 1997) für das Postprocessing von GPS-Beobachtungen in globalen und großräumigen Netzen etabliert hat.

#### 4.4.2 PPP-Beobachtungsmodell

Das Precise Point Positioning setzt Zweifrequenzbeobachtungen auf allen auszuwertenden Stationen voraus. Mit Bildung der ionosphärenfreien Linearkombination für die Code- und Trägerphasenbeobachtungen  $P_0$  und  $\Phi_0$  lässt sich dann die ionosphärische Laufzeitverzögerung  $\delta I$  aus den Beobachtungsgleichungen eliminieren:

$$P_{0,r}^s = (R^s - R_r) + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + \varepsilon_P \quad (4.36)$$

$$\Phi_{0,r}^s = (R^s - R_r) + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + \lambda N_{0,r}^s + \varepsilon_\Phi \quad (4.37)$$

Nach Einführung präziser Satellitenbahn- und -uhrparameter werden die beiden Ausgangsgleichungen um den Orbitfehler  $X^s$  und den Satellitenuhrfehler  $dt^s$  reduziert:

$$P_{0,r}^s = (\hat{R}^s - R_r) + cdt_r + M(E_r^s)\delta_{T_{z_r}} + \varepsilon_P \quad (4.38)$$

$$\Phi_{0,r}^s = (\hat{R}^s - R_r) + cdt_r + M(E_r^s)\delta_{T_{z_r}} + \lambda N_{0,r}^s + \varepsilon_\Phi \quad (4.39)$$

Der troposphärische Laufzeitfehler  $\delta T$  wird dagegen aus den Beobachtungen des Rovers geschätzt. Er dient zur Berücksichtigung räumlicher Korrelationen zwischen benachbarten Stationen und wird als Produkt einer Mapping-Funktion  $M(E_r^s)$ , für den Elevationswinkel  $E$  des Satelliten  $s$  bezogen auf den lokalen Horizont des Empfängers  $r$ , mit der zenitalen troposphärischen Laufzeitverzögerung  $\delta_{T_{z_r}}$  ausgedrückt (Kouba, Héroux 2001).

Die globalen Satellitenbahn- und -uhrparameter sind in den Beobachtungsgleichungen aller Stationen identisch. Durch deren Einführung als nahezu fehlerfreie Werte werden über die Designmatrix die stationsabhängigen Parameter dekorreliert. Die Stationen können damit unabhängig voneinander ausgewertet

werden, was bei zahlreichen zu verarbeitenden Stationen und insbesondere bei Permanentstationsauswertungen numerisch vorteilhaft ist. Gegenüber einer Netzauswertung können jedoch nicht alle Korrelationen zwischen den zeitgleich beobachteten Stationen berücksichtigt werden.

PPP-Software wie beispielsweise GIPSY basiert auf der Auswertung undifferenzierter Beobachtungen. In diesem Modell lassen sich die globalen Satellitenparameter streng einführen und auch die zahlreichen systematischen Effekte, die bei der Auswertung sehr großräumiger Netze auftreten, berücksichtigen. Ohne nähere Erläuterung seien die wichtigsten Einflüsse aufgezählt (Kouba, Héroux 2001):

- Offset und PCV der Satellitenantenne
- Phase Wind-up
- Gezeiten der festen Erde
- Meeresgezeiten
- Erdrotation
- Periodischer relativistischer Effekt.

#### 4.4.3 Anwendungen des PPP-Konzeptes

Die für PPP-Auswertungen erforderlichen präzisen Bahn- und Uhrparameter stellen u.a. das Jet Propulsion Laboratory (JPL) und der IGS im Internet bereit. Die IGS Rapid Orbits und Uhrprodukte weisen eine Genauigkeit im Zentimeterbereich auf. Zu beachten sind jedoch unterschiedliche Bezugspunkte gegenüber den Broadcast Ephemeriden. Während sich beispielsweise die B.E. auf das Antennenphasenzentrum der GPS-Satelliten beziehen, sind die JPL Orbits und Uhren auf den Massenschwerpunkt des Satelliten berechnet.

Eine Organisation, die die globalen IGS-Produkte in ihren nationalen DGPS-Dienst einbindet, ist die Geodetic Survey Division (GSD) of Natural Resources Canada (NRCan). Für ihren Real Time GPS Korrekturdienst GPS\*C stellt sie IGS Ultra Rapid Orbits, IGS Satellitenuhren im 5 Minuten Intervall sowie Trägerphasendaten des Kanada überdeckenden WADGPS-Netzes zur Verfügung. Mit diesem PPP-Dienst sind im Postprocessing Genauigkeiten von 1–10 cm und in Echtzeit 10–30 cm erreichbar.

Für die Echtzeitauswertung in einem seit 2001 entwickelten Globalen DGPS (GDGPS)-System (Muellerschoen et al. 2001) wurde die Postprocessing-Software des JPL erweitert zu einer echtzeitfähigen Version RT-GIPSY (RTG). Das GDGPS ist eine Weiterentwicklung des klassischen DGPS-Prinzips für kontinentale und globale Augmentationssysteme. Es ermöglicht Nutzern mit Zweifrequenzempfängern mit float-Lösungen weltweit eine absolute Genauigkeit von 1 dm in der Lage und 2 dm in der Höhenkomponente bei kinematischen Anwendungen. Es setzt sich aus einem Dutzend der 60 weltweit verteilten Referenzstationen des NASA Global GPS Network (GGN) zusammen, deren Beobachtungen per Internet mit einer Datenrate von 1.800 bps je Station zu einem Rechenzentrum übertragen werden. Dort werden Differentialkorrekturen in Form von Verbesserungen an den Bahn- und Satellitenuhrparametern der Broadcast Message berechnet und mit einer Datenrate von 560 bps sowie einer Aufdatierungsrate von 1 Hz über einen TCP-Server in das Internet eingespeist. Die Berechnung und Verteilung der Korrekturen erfolgt im Internet Global Differential GPS (IGDG) System, dessen Kern RTG ist. Zur Positionsberechnung benötigen Nutzer eine lokale RTG-Version, Standard-GPS-Software ist nicht einsetzbar.

RTG, die Echtzeitversion von GIPSY, ist auch Kern der beiden kommerziellen WADGPS-Systeme Satloc und StarFire. Das Satloc-System (Withhead et al. 1998) ist auf Anwender mit Einfrequenz-C/A-Codeempfänger ausgelegt und ermöglicht im kontinentalen Bereich der USA Positionierungen mit Metergenauigkeit. Das System ist seit 1997 mit 14 Referenzstationen im Dienst, die Korrekturdatenausstrahlung erfolgt per L-Band Kommunikationssatelliten. Die mit einem speziellen, im GPS-Empfänger integrierten L-Band-Empfänger empfangenen Zustandskorrekturen werden in Standard-RTCM-Nachrichten gewandelt.

Das StarFire (Hatch et al. 2001) von John Deere arbeitet demgegenüber mit speziell entwickelten Zweifrequenzempfängern auf Nutzerseite und bietet damit weltweit Genauigkeiten im dm-Bereich. Eine der Hauptanwendungen ist das Precision Farming. Die Korrekturdaten werden mit Inmarsat-Satelliten im L-Band (1525–1565 MHz) ausgestrahlt.

Das SPP- und PPP-Prinzip zeigt abschließend auch einen alternative Weg für die Berechnung und Verteilung der Korrekturdaten auf. Die PPP-Produkte können als Elemente eines umfassenderen Zustandsvektors aufgefasst werden, wie er in Kap. 7 erläutert wird. Weiterhin zeigt sich, dass die einzelnen Korrekturterme nicht alle von einem einzigen PDGPS-Serviceanbieter berechnet werden müssen. Die Berücksichtigung entsprechend vereinbarter Standards vorausgesetzt, sollte es auch möglich sein, Zustandsparameter aus verschiedenen Quellen zu beziehen. Weitere Alternativen bietet die Verteilung der Parameter, die entweder von den Nutzern selbst zur Korrektur ihrer Beobachtungen verwendet werden oder dazu genutzt werden, vorab die auszustrahlenden Daten der Broadcast Message zu korrigieren. Wendet ein Nutzer die verbesserten Broadcastinformationen an, führt er das Precise Point Positioning durch, ohne eigene Korrekturberechnungen anstellen zu müssen.

#### 4.5 Vergleichende Analyse

Nach Einführung des ersten RTK-Systems 1993 für die lokale GPS-Positionierung in Echtzeit folgte bereits 1996 der erste Vorschlag für eine Multistationslösung in Echtzeit, um mit wenigen permanent installierten Referenzstationen einen präzisen differentiellen Positionierungsdienst für regionale Gebiete aufzubauen. Bis heute wurden mehrere, in diesem Kapitel vorgestellte Ansätze entwickelt, von denen jedoch mit dem FKP- und dem VRS-Modell nur zwei im operationellen Echtzeitbetrieb eingesetzt sind. So ist das niedersächsische SAPOS-Referenzstationsnetz seit dem 1.1.2004 im operationellen Betrieb. Die lange Entwicklungs- und Testphase ist zum einen auf notwendige Weiterentwicklungen der Auswertemodelle zurückzuführen, zum anderen auf technische und logistische Entwicklungen, die im nächsten Kapitel 5 beschrieben werden.

Für eine Beurteilung der Vernetzungs- und Repräsentationsmodelle ist zunächst zu unterscheiden, nach welchem Prinzip - Parameterelimination oder Parameterschätzung - die Beobachtungsgleichung ausgewertet wird. Die Parameterschätzung eröffnet hier viel weitergehendere Möglichkeiten der Modellierung der verschiedenen Fehleranteile. Die funktionalen und stochastischen Auswertemodelle der verschiedenen Ansätze sind nur zu einem geringen Teil veröffentlicht und werden deshalb nicht weiter beurteilt. Sie lassen sich nur in ihrer Auswirkung auf die Positionsbestimmung einschätzen, wobei aufgrund sehr unterschiedlicher Testbedingungen die Ergebnisse kaum vergleichbar sind. Echte Vergleichstest in identischen Testumgebungen hat es bislang nur in wenigen Einzelfällen gegeben, als umfangreichster Test ist hier der Vernetzungstest der LGN in der südniedersächsischen Referenzstationsmasche zu nennen (Jahn et al. 2001).

Die praktische Realisierung der Referenzstationsvernetzung erfordert die Konformität mit dem RTCM-Standard. Weil dieser nur die Ausstrahlung von Korrekturdaten vorsieht und Multistationslösungen nicht kennt, mussten auf die Vernetzungslösungen zusätzlich Repräsentationsmodelle aufgesetzt werden, um die Übertragung der Korrekturdaten und deren Nutzung zu gewährleisten. Varner (2000) beschränkt sich auf die Berechnung von Positionskorrekturen aus der Taylor-Entwicklung der GPS-Beobachtungsgleichung. Die Positionskorrekturen werden jedoch den individuellen Fehleranteilen in den Beobachtungen nicht gerecht. Bei dem als optimal ermittelten Modell 4. Ordnung besteht die Gefahr der Überparametrisierung, auf jeden Fall ist die dafür erforderliche Anzahl zu übertragender Parameter ineffektiv. Dieses Problem vermeiden Wübbena et al. (1996) durch Einführung von zwei Interpolationsflächen für die geometriefreie und die ionosphärenfreie Linearkombination. Damit sind die entfernungsabhängigen Fehleranteile zumindest teilweise nach ihrer Quelle getrennt, was eine physikalisch zutreffendere Korrektur der Roverbeobachtungen ermöglicht. Mit nur vier Koeffizienten, den Flächenkorrek-

turparametern (FKP), die zudem noch in unterschiedlichen Zeitintervallen übertragen werden können, wird die Datenkommunikationsverbindung nur geringfügig belastet.

Die Filterung und Prädiktion nach kleinsten Quadraten ermöglicht die optimale Schätzung der Beobachtungskorrekturen für einen Rover und liefert als einziges der Vernetzungs- und Repräsentationsmodelle auch stochastische Informationen dazu. In der von Raquet (1998) entwickelten Form ist der Ansatz jedoch weder RTCM-konform noch in Echtzeit realisierbar. Der größte Nachteil ist die Notwendigkeit, die Kovarianzfunktionen vorab im Postprocessing zu bestimmen anstatt aus den aktuellen Beobachtungen im Netz. Schon bei leichten ionosphärischen Unregelmäßigkeiten sind diese Kovarianzfunktionen nicht mehr repräsentativ, wie die Untersuchungen von Fortes (2002) in Brasilien zeigen. Erst recht scheitert der Versuch, die in einem kanadischen Netz bestimmten Kovarianzfunktionen auch in anderen Netzen einzusetzen.

Eine Alternative zu den Broadcastverfahren ist die Virtuelle Referenzstation. Von der Notwendigkeit einer zweiseitigen Kommunikationsverbindung abgesehen ist das Verfahren bei statischen Messungen unter praktischen Gesichtspunkten leicht einsetzbar. Auf einen Hardware- oder Software-Decoder kann verzichtet werden. Die Rover-Software verarbeitet die virtuellen Daten so, als handele es sich um Beobachtungen einer unmittelbar benachbarten Referenzstation. Dabei tritt jedoch ein Problem auf, da VRS-Beobachtungen genauso mit einem Repräsentationsfehler behaftet sind, wie die aus FKP abgeleiteten Beobachtungen. Bei dem FKP-Verfahren, als erster Fall in Abb. 4.10 dargestellt, erwartet der Rover aufgrund des ihm mitgeteilten Abstandes zur realen Referenzstation größere Restfehler, als sie nach Anbringen der FKP tatsächlich noch enthalten sind. Bei dem VRS-Verfahren, dem zweiten Fall in Abb. 4.10, erwartet der Rover aufgrund des geringen Abstands zur virtuellen Station dagegen praktisch keine Restfehler. In beiden Fällen sind die von der Auswertesoftware des Rovers gewählten Auswertemodelle nicht optimal, was zu Initialisierungsproblemen und Positionsfehlern führen kann. Um die Rover-Software zur Wahl eines Auswerteansatz zu zwingen, die dem angenommenen Repräsentationsfehler besser entspricht, können entsprechend generierte Koordinaten einer Referenzstation vorgegeben werden. Diese von Wübbena (2002) als Pseudoreferenzstation (PRS) bezeichnete Position ist in Abb. 4.10 als dritter Fall dargestellt. Abhängig vom Softwarehersteller wird die PRS im Abstand von 5 bis 10 km vom Rover gewählt. Eine dadurch erzwungene L0-Koordinatenlösung kann allerdings bei ruhiger Ionosphäre zu ungenaueren Ergebnissen gegenüber einer L1-Koordinatenlösung führen.

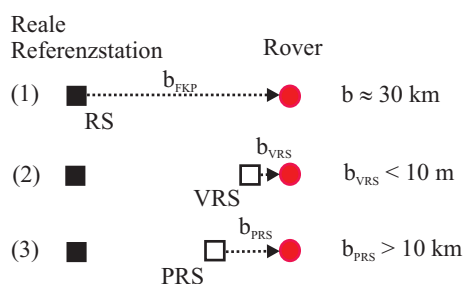


Abbildung 4.10: Einführung einer Pseudoreferenzstation (PRS), damit der Rover ein dem angenommenen Repräsentationsfehler entsprechendes Auswertemodell wählt (nach Wübbena (2002))

Die unterschiedliche Vorgehensweise bei FKP und VRS bedingt eine unterschiedliche Behandlung der entfernungsabhängigen Fehler, hier insbesondere der troposphärischen Refraktionskorrektur. Nach dem RTCM-Standard dürfen Beobachtungen nicht wegen troposphärischer Laufzeitfehler korrigiert werden. Der Rover soll mit einem eigenen Troposphärenmodell die Fehlereinflüsse korrigieren, die sich aus der unterschiedlichen Lage und Höhe von Referenzstation und Rover ergeben. Um vollständige synthetische Beobachtungen einer VRS zu erhalten, muss eine troposphärische Korrektur eingerechnet werden. Dieser für die Näherungsposition abgeschätzte Wert entspricht jedoch nicht exakt den am Beobachtungsort herrschenden Verhältnissen, die Differenz fließt in den Repräsentationsfehler ein. Da der Rover die

tatsächliche Position der realen Referenzstation nicht kennt, kann er keine weitere troposphärische Korrektur anbringen. Bei dem FKP-Verfahren wird dagegen nur der entfernungsabhängige Anteil der Troposphäre in den FKP berücksichtigt, ansonsten bestimmt der Rover seine Refraktionskorrektur selbst. Die Frage der troposphärischen Modellkorrektur, die im Prinzip auch für den ionosphärischen Fehleranteil gilt, wird in der Literatur kontrovers diskutiert, siehe u.a. Landau et al. (2003b). Die Diskussion zeigt die Notwendigkeit für den Einsatz standardisierter Troposphärenmodelle im Referenzstationsnetz und auf den Rovern, die für die Weiterentwicklung der Referenzstationsvernetzung ohnehin notwendig werden wird.

Unabhängig von der Diskussion um die Konformität zum RTCM SC-104 Standard bleibt festzustellen, dass es sich sowohl bei dem FKP- als auch bei dem VRS-Verfahren um Repräsentationsmodelle für entfernungsabhängige GPS-Fehler handelt, die auf einer Interpolation der in einer Multistationsauswertung berechneten Residuen der Referenzstationsbeobachtungen beruhen. Und genau in dem Auswerteprozess, in den verwendeten funktionalen und stochastischen Modellen begründen sich die Unterschiede der Ergebnisse beider Lösungen. Verfahrenstechnisch können Lösungen mit Flächenkorrekturparametern auch in Beobachtungen einer Virtuellen Referenzstation umgerechnet werden. Umgekehrt können aus dem zur VRS-Berechnung notwendigen Interpolationsmodell Netzkoeffizienten abgeleitet werden. Für die Auswahl eines Verfahrens sollte alleine die Anwendung ausschlaggebend sein.

Mit der Spezialstudien-Gruppe SSG 1.179 der IAG Commission 4 unter der Leitung von C. Han hat sich in der Arbeitsperiode 1999–2003 auch ein weltweiter Kreis von Wissenschaftlern der präzisen Echtzeitpositionierung in Wide Area Netzen gewidmet. Konkrete Ergebnisse wurden bislang nur wenige publiziert. Empirische Ergebnisse in den überwiegend theoretischen Analysen basieren vielfach nur auf reinen Post-processing-Lösungen. Der Focus der Veröffentlichungen lag auf dem VRS-Verfahren. Die schnellen und umfangreichen Entwicklungen in Deutschland im Zuge der SAPOS-Einrichtung wurden von dem durch nordamerikanische und australische Wissenschaftler dominierten Gremium kaum aufgegriffen.

Die Arbeiten werden in der Periode 2003–2007 in der Subkommission SC 4.5 „Next Generation RTK“ wiederum unter der Leitung von C. Han fortgeführt. Innerhalb dieser Subkommission leitet L. Wanninger die Arbeitsgruppe WG 4.5.1 RTK-Netze (<http://www.network-rtk.info>) und S.B. Bisnath die Arbeitsgruppe WG 4.5.2 Trägerphasenbasiertes PPP.



## 5 Referenznetzsegment

### 5.1 Einleitung

Die schnelle zentimetergenaue Positionsbestimmung mit einem mobilen GPS-Empfänger ist über kurze Entfernungen mit Hilfe einer aktiven GPS-Referenzstation und einem echtzeitfähigen Kommunikationssystem möglich. Die Positionierungskonzepte und das mathematische Modell dieser präzisen differentiellen GPS-Positionierung mit nur einer Referenzstation wurden in Kap. 3 erläutert. Die darauf aufbauende Erweiterung auf Echtzeit-Multistationslösungen erfolgt in Kap. 4, in dem die Grundlagen wesentlicher Vernetzungskonzepte vorgestellt werden. Die praktische Umsetzung der Multistationsansätze in eine aktive Referenzstationsvernetzung gelingt nur unter der Voraussetzung, dass eine ganze Reihe weiterer Problemstellungen gelöst wird. Dazu zählen die bereits beschriebenen Datenformate (Kap. 3.5), die gesamte technische Infrastruktur der Referenzstationen und des Netzes bis hin zur Ausstattung der Rover, die Datenkommunikation als zentraler technischer Kern der Echtzeitlösung und nicht zuletzt ein Dienst, der den kontinuierlichen reibungslosen Betrieb des Referenznetzes gewährleistet.

Die präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen erfordert, wie Wanninger (2000) aufgezeigt hat, die Ergänzung (Augmentation) der drei bekannten Segmente des GPS-Systems um ein weiteres Segment der Referenzstationen. Für Echtzeit-Multistationslösungen ist ein solches Referenznetzsegment feiner zu untergliedern in die drei Module Referenzstationen, Kommunikation und Dienste (Abb. 5.1). Die Abbildung zeigt, dass Nutzer zusätzlich zu den Signalen der GPS-Satelliten (Raumsegment) Korrekturdaten, die vom Referenznetzsegment verbreitet werden, zur präzisen Echtzeitpositionierung benötigen. Im Gegensatz zu dem nur passiv nutzbaren GPS-System bietet das Referenznetz nicht nur eine Arbeitsgrundlage, sondern mit dem Dienst auch einen wichtigen Ansprechpartner. Das Referenznetzsegment nutzt und überwacht das Raumsegment zugleich, bei Funktionsstörungen einzelner Satelliten oder anormalen Verhältnissen, z.B. der Ionosphäre, kann der Dienst Warnungen an die Nutzer aussenden. Im Unterschied zum Kontrollsegment fließen solche Integritätsinformationen jedoch nicht zurück in das Kontroll- oder Raumsegment.

Zuerst werden im nachfolgenden Kap. 5.2 Kommunikationslösungen für die Korrekturdatenübertragung einschließlich der zu bewältigenden Schwierigkeiten erläutert. Es folgt eine Beschreibung des wesentlichen technischen Aufbaus von Referenzstationen und deren Verknüpfung zu Referenznetzen (Kap. 5.3), wobei auch die Nutzerseite einbezogen wird (Kap. 5.4). Anschließend werden die wesentlichen Komponenten einer Referenznetzzentrale vorgestellt. Die Anforderungen an einen Referenzdienst, der wesentlich mehr umfasst als nur Hard- und Software, werden in Kap. 5.5 formuliert. Eine Übersicht operationeller Referenznetzdienste (Kap. 5.6) schließt das Kapitel ab.

Die Darstellungen orientieren sich an einem grundsätzlichen, modularen Aufbau der Systemkomponenten. Zu den Zielen der beiden in Brasilien eingerichteten Referenzstationsnetze gehört die Einbeziehung vor Ort verfügbarer Technik. Daneben existieren weitere technische Lösungen, die sich vor allem durch sehr kompakte Hardware auszeichnen. Diese integrierten Geräte umfassen GPS-Empfänger, Prozessoren, die vollständige PDGPS-Lösungen berechnen, und unterschiedliche Kommunikationsanschlüsse. Aus den nachfolgenden Erläuterungen kann die Funktion dieser spezialisierten Hardware leicht nachvollzogen werden.

### 5.2 Kommunikationslösungen zur Korrekturdatenübertragung

Zur Echtzeitpositionierung ist nach den in Kap. 3 beschriebenen Verfahren die zeitnahe Übertragung von Beobachtungen oder Korrekturdaten, ggf. auch weiterer Betriebs- und Statusinformationen, zwischen

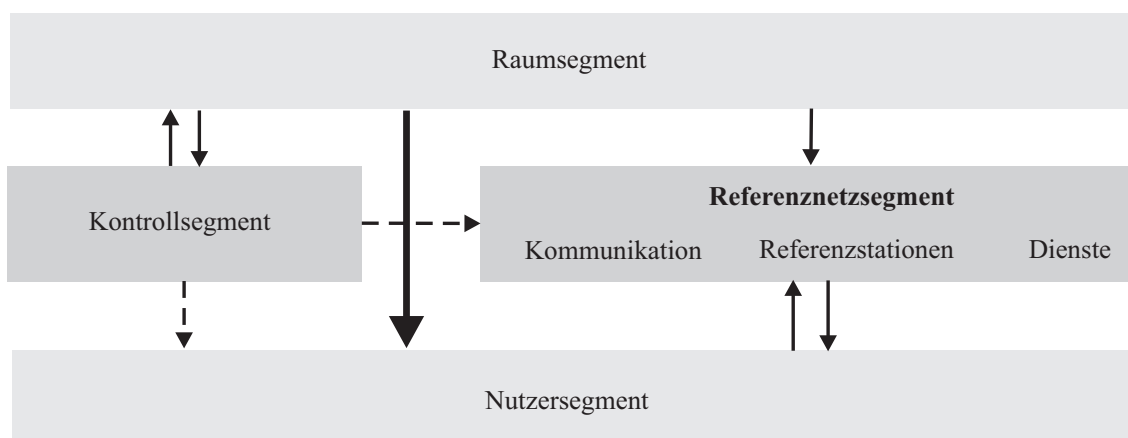


Abbildung 5.1: Referenzstationen, Kommunikationslösungen und Dienste ergänzen die klassischen Segmente des GPS-Systems

den Referenzstationen zu einer Netzzentrale und von dort zu einem mobilen Nutzer notwendig. Die Datenübertragung zu einem mobilen Nutzer muss kabellos erfolgen, die Kommunikation zwischen den Referenzstationen kann kabellos oder leitungsgebunden erfolgen.

Für die kabellose Datenübertragung stehen verschiedene funkbasierte Kommunikationssysteme zur Verfügung. Bei der Auswahl eines Verfahrens sind das nur begrenzt verfügbare Frequenzspektrum und die Eigenschaften der jeweiligen Frequenzbereiche den aus der Echtzeitanwendung resultierenden Anforderungen gegenüberzustellen.

Zu den wesentlichen Anforderungen an Datenübertragungsverfahren gehören die Übertragungsrate, die Übertragungszeit, die Flächendeckung, die Zuverlässigkeit und der technische und finanzielle Aufwand sowohl für den Betreiber als auch für den Nutzer. Die Bandbreite des Kommunikationsmediums muss ausreichend sein, um die code- und trägerphasenbasierten Korrekturdaten einschließlich der Vernetzungs- und weiterer Systemparameter übertragen zu können. Die Übertragungszeit der Trägerphasenkorrekturen darf dabei 1 s nicht überschreiten, weil ein höheres Datenalter die Positionierungsgenauigkeit beeinträchtigt. Für die weiteren Parameter sind längere Übertragungszeiten von mehreren Sekunden akzeptabel. Eine räumlich und zeitlich uneingeschränkte Verfügbarkeit ist Voraussetzung für die Effektivität und die Akzeptanz des Echtzeitpositionierungsverfahrens. Die Forderung der Flächendeckung beinhaltet dabei implizit die Frage nach der Reichweite verschiedener Kommunikationsmedien und damit nach der Anzahl und Verteilung der Sendestationen. Soweit die Flächendeckung grundsätzlich gesichert ist, muss das Kommunikationsmedium auch die zuverlässige, d.h. vollständige und fehlerfreie Datenübertragung gewährleisten. Ein weiterer wesentlicher Gesichtspunkt für die Einrichtung und den Betrieb eines Kommunikationssystems ist der technische und finanzielle Aufwand für den Referenznetzbetreiber. Der Aufwand muss in einem angemessenen Verhältnis zum eigentlichen Ziel eines Positionierungsdienstes stehen. Dies gilt gleichermaßen für jeden Nutzer bei der Anschaffung der Kommunikationsendgeräte und für die laufenden Nutzungsentgelte.

Eine Übersicht über die zur Echtzeitkorrekturdatenübertragung geeigneten Kommunikationslösungen gibt Tab. 5.1. Für jedes Kommunikationsmedium ist die Art der übertragbaren Korrekturdaten angegeben, die Reichweite eines einzelnen Senders und die jeweilige Datenübertragungsrate. Die zellularen Mobilfunknetze ermöglichen zwar ebenso wie das Internet eine globale Kommunikation, dabei ist jedoch die regional beschränkte Gültigkeit der Korrekturdaten zu beachten, die eine globale Verbreitung sinnlos machen. Die angegebenen Reichweiten beziehen sich bei den Funkverfahren auf den einzelnen Sender, die tatsächliche Reichweite hängt von einer Vielzahl Faktoren ab. Auch die analogen und digitalen Rundfunksender bilden Ketten, so dass regionale Sendegebiere abgedeckt werden können. Bei den

Tabelle 5.1: Kommunikationslösungen zur Echtzeit-Korrekturdatenübertragung an mobile Nutzer

Medium	Typ	Reichweite km	Bandbreite bps	Betrieb	Nutzer
LW/ALF	DGPS	600	300	simplex	unbegrenzt
UKW/RASANT	DGPS	50	100	simplex	unbegrenzt
DAB / DVB-T	PDGPS	50	8.000	simplex	unbegrenzt
UHF-Funk (70 cm)	PDGPS	wenige km	9.600*	semi-duplex	unbegrenzt
VHF-Funk (2 m)	PDGPS	40	2.400*	semi-duplex	unbegrenzt
Mobilfunk	PDGPS	global	9.600	duplex	1 pro Kanal
Internet	PDGPS	global	> 9.600	duplex	unbegrenzt

Bandbreiten ist zu beachten, dass sich die Werte einerseits auf den Unterträger beziehen, (UKW, DAB), andererseits auf die Nutzlast (UHF/VHF, Mobilfunk). Bei dem UHF- und VHF-Funk hängt die Reichweite entscheidend vom Senderstandort und der Sendeleistung ab, mehrere 10er km sind jeweils erreichbar. Abhängig vom Modulationsverfahren können mit UHF und VHF Übertragungsraten von 19.200 bps erreicht werden, die in der Tab. 5.1 mit Sternchen gekennzeichneten Werte haben sich ursprünglich aus der speziellen Konfiguration für die GPS-Korrekturdatenübertragung ergeben.

Die Anzahl der möglichen Nutzer und die Betriebsart ergeben sich aus den Eigenschaften des Kommunikationssystems. Broadcastsysteme senden unidirektional (simplex) und können von einem Sender aus unbegrenzt viele Nutzer versorgen. Datenfunkgeräte können im allgemeinen als Sender oder als Empfänger genutzt werden (semi-duplex), aber nicht beides gleichzeitig. Im Gegensatz zum Datenfunk wird beim Mobilfunk für jeden Nutzer eine eigene Verbindung benötigt, die zugleich Senden und Empfangen ermöglicht (duplex). Für die Datenübertragung im Internetprotokoll kann der Mobilfunk als Transportmedium eingesetzt werden, allerdings sind auch weitere Kommunikationsmedien verwendbar. Darüber hinaus gibt es mit dem Festnetztelefon und Datenträgern (z.B. CD, DVD, DAT) weitere nicht echtzeitfähige Kommunikationssysteme, die bei Postprocessinganwendungen eingesetzt werden.

Die in Tab. 5.1 aufgeführten Kommunikationslösungen werden, in vier Abschnitte unterteilt, näher beschrieben. Nach einer Übersicht über die kabellosen Datenübertragungsverfahren wird am Beispiel der Funkdatenübertragung auf das Grundprinzip, auf die Reichweitenproblematik und auf die häufigsten Störungen eingegangen. Zuerst wird dann der Betriebs- und Bündelfunk im UHF- und VHF-Bereich (Kap. 5.2.2) erläutert, gefolgt von den Broadcastsystemen (Kap. 5.2.3) und den zellularen Kommunikationssystemen (Kap. 5.2.4), wie der digitale Mobilfunk hauptsächlich bezeichnet wird. Den letzten dieser Abschnitte bildet die gegenwärtig in Entwicklung befindliche Echtzeitdatenübertragung per Internet (Kap. 5.2.5). Das Kap. 5.2 endet mit einer vergleichenden Betrachtung der verschiedenen Kommunikationslösungen, wobei auch auf die in Brasilien für die Echtzeitkorrekturdatenübertragung verfügbaren Kommunikationstechnologien eingegangen wird.

## 5.2.1 Kabellose Datenübertragungsverfahren

### 5.2.1.1 Übersicht

Die kabellosen Datenübertragungsverfahren lassen sich in Funkssysteme, zellulare Kommunikationssysteme und Broadcastsysteme unterteilen. Diese Systeme sind regional, national und teilweise auch kontinental verfügbar. Schnurlose Kommunikationssysteme haben aufgrund ihrer lokalen Gebietsabdeckung

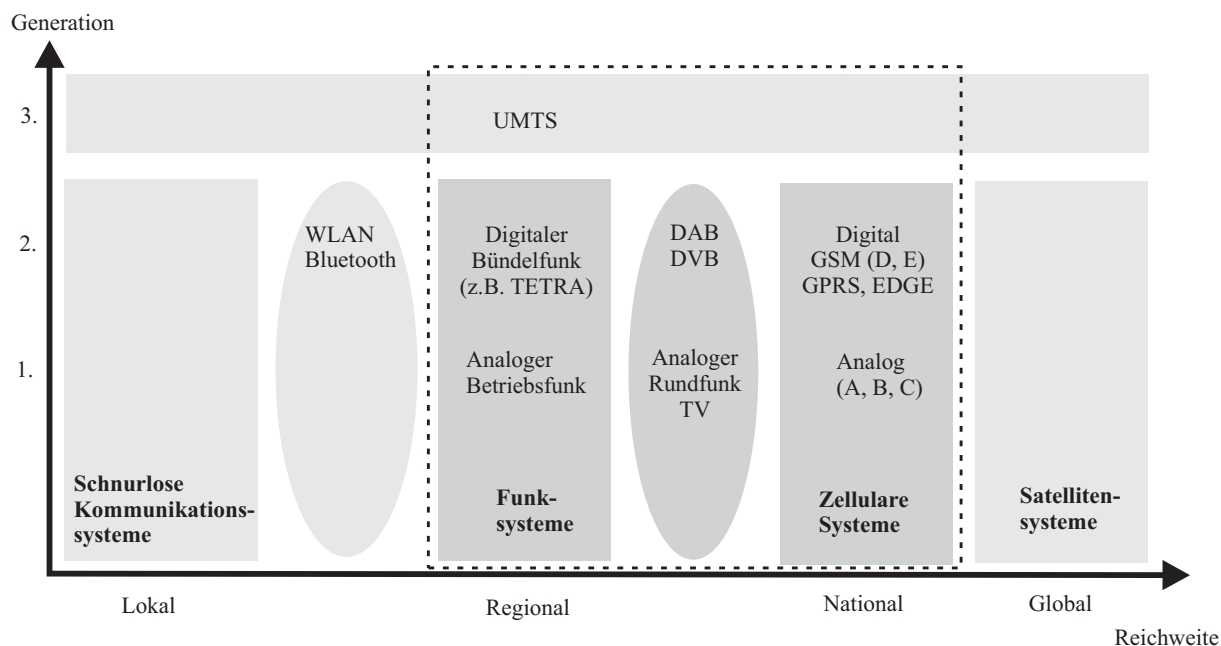


Abbildung 5.2: Entwicklung der Broadcast- und Mobilkommunikationssysteme (nach Duque-Antón 2002)

für die Korrekturdatenübertragung keine Bedeutung. Über Satellitensysteme wie Inmarsat werden dagegen Code-Korrekturdaten weiträumig ausgestrahlt, Trägerphasenkorrekturen sind aufgrund der geringen Bandbreite bislang nicht verfügbar. In Abb. 5.2 sind die Broadcast- und Mobilkommunikationssysteme dargestellt, gegliedert nach der Reichweite und der Entwicklungsstufe der Mobilfunksysteme.

Zellulare Mobilfunknetze bieten ihren Dienst öffentlich an. Daneben existieren private Funkdienste wie der Betriebsfunk, die nur von geschlossenen Anwendergruppen für spezielle Anwendungen auf fest zugewiesenen Kanälen genutzt werden. Bündelfunknetze bauen auf dem Betriebsfunk auf. Statt fester Kanalzuordnungen zwischen den Nutzern werden freie Kanalkapazitäten aus einer größeren Gesamtmenge optimal ausgelastet (Duque-Antón 2002). Prinzipiell handelt es sich bei Bündelfunknetzen um zellulare Netze mit mehreren Feststationen zur Abdeckung regionaler Gebiete.

Betriebsfunknetze sind dezentral organisiert, mobile Funkempfänger treten direkt miteinander in Verbindung. Im Gegensatz dazu sind zellulare Mobilfunknetze zentral organisiert, Mobilstationen sind über Funk- und Vermittlungszentralen verbunden. Diese eingeschlossene Vermittlungsfunktion unterscheidet Mobilfunknetze von den Broadcastsystemen beispielsweise des Rundfunks und des Fernsehens, die von einem Punkt aus beliebig viele andere Empfänger versorgen.

Mit UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), dem Mobilfunksystem der 3. Generation, wird über eine gemeinsame Schnittstelle ein einheitlicher Zugang zu den verschiedenen mobilen Kommunikationssystemen realisiert. Auf der Basis des paketorientierten Internetprotokolls werden Sprach- und Datendienste mit mobilen Internetdiensten verschmolzen.

Die Verwendung von Funkfrequenzen ist sowohl national als auch international stark reguliert, weil die Zahl der potentiellen Nutzer beständig steigt, das Frequenzspektrum aber nicht erweiterbar ist. In Deutschland wird die Frequenzzuweisung von der Regulierungsbehörde für Post und Telekommunikation (RegTP) und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) auf der Grundlage des Telekommunikationsgesetzes (TKG) vorgenommen. Die aktuellen und geplanten Frequenznutzungen sind im Frequenznutzungsplan detailliert und rechtsverbindlich dokumentiert. Auf der Basis dieses Dokumentes erfolgt die Frequenzzuteilung an die Nutzer.

### 5.2.1.2 Grundprinzip der Funkdatenübertragung

Ein Funkmodem dient der drahtlosen Übertragung von Korrekturdaten einer Referenzstation zu den Nutzern. Das Funkmodem wandelt die von einem GPS-Empfänger oder einem Computer gelieferten digitalen Daten in ein analoges elektrisches Signal um, das einer Trägerfrequenz aufmoduliert wird. Dieses Signalgemisch wird über eine Antenne in die Luft abgestrahlt. Je nach Bauart der Antenne können die Signale entweder gebündelt in eine bestimmte Richtung (Richtantenne) oder omnidirektional abgestrahlt werden. Auf der Empfängerseite induzieren die elektromagnetischen Wellen in der Antenne ein analoges elektrisches Signal, das von einem angeschlossenen Modem in ein digitales Signal zurückgewandelt und an eine Datenverarbeitungseinheit weitergegeben wird.

Die verfügbaren Funkmodems unterscheiden sich zunächst nach dem Frequenzbereich der Trägerwelle. Für die unterschiedlichen Wellenlängen im UHF- und VHF-Band werden spezielle Antennen benötigt, deren Länge entweder der ganzen Wellenlänge oder einem Bruchteil davon ( $1/2$ ,  $1/4$ ) entspricht. Die meisten Funkmodems sind in der Regel sowohl als Sender als auch als Empfänger einsetzbar. Jedoch gibt es spezielle Funkmodems, die für den Dauerbetrieb mit hohen Sendeleistungen ausgelegt sind. Die auf dem Markt verfügbaren Funkmodems unterscheiden sich hauptsächlich darin, welches Modulations- und Kodierungsverfahren für die drahtlose Übertragung eingesetzt wird.

### 5.2.1.3 Störungen der Datenübertragung

Bei der Funkdatenübertragung können eine Reihe von Störungen auftreten, da die Ausbreitung von Hochfrequenzwellen äußerst komplexen Wechselwirkungen unterliegt, die von Nutzern kaum beeinflusst werden können. Zu den häufigsten Störungen bei der Funkdatenübertragung gehören (PCC 1996):

- Kollisionen: Senden mehrere Funkmodems auf der gleichen Frequenz, stören sich die übertragenen Signale gegenseitig. Benachbarte Sender müssen deshalb auf unterschiedlichen Frequenzen senden. Dies ist problematisch, da nicht beliebig viele Frequenzen zur Verfügung stehen und ein gewisser Mindestkanalabstand eingehalten werden muss. Außerdem ist es schwierig, die tatsächlichen Reichweiten der einzelnen Sender für jeden Frequenzbereich richtig abzuschätzen.
- Signaldämpfung: Die maximale Reichweite (Radiohorizont) von Hochfrequenzsignalen, die sich geradlinig ausbreiten, ist eine Funktion der Höhen der Sende- und Empfangsstandorte. Der Radiohorizont bezeichnet die maximal mögliche Entfernung für eine direkte Sichtverbindung. Die tatsächlich erreichbare Entfernung hängt von der Sendeleistung ab und verkürzt sich infolge von Energieverlusten entlang des Signalweges.
- Signal Fading: Durch Ausbreitungshindernisse oder Mehrwegeausbreitungen verringert sich die Signalstärke bis hin zum Signalverlust. Durch hohe Sendeleistungen und exponierte Senderstandorte, die eine Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger ermöglichen, kann Fading reduziert werden.
- Mehrwegeausbreitung: Der gleichzeitige Empfang von reflektierten und direkt empfangenen Signalen (Überlagerung) führt zum Fading und Verlust des Signalempfangs. Andererseits ist die Reflexion an Oberflächen die Voraussetzung für Funkempfang in dicht bebauten Gebieten.
- Störanfälligkeit: Die Anfälligkeit der Signale gegenüber z.B. atmosphärischen Störungen und Signalrauschen hängt vom verwendeten Modulationsverfahren (z.B. Fast Frequency Shift Keying (FFSK) oder Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK)) ab. Weiterhin sind digitale Übertragungsverfahren unanfälliger gegenüber Störungen als analoge Signalübertragungen.
- Bitfehlerrate: Bitfehler werden durch Interferenzen oder zu geringe Signalpegel verursacht. Es werden verschiedene Verfahren zur Fehlerdetektion und Fehlerkorrektur angewendet, die im wesentlichen durch Hinzufügen redundanter Informationen die sofortige Fehlerkorrektur ermöglichen. Die zu übertragende Menge an Nutzdaten wird um so mehr reduziert, je sicherer das Fehlerkorrekturverfahren ist.

### 5.2.1.4 Reichweite eines UHF- oder VHF-Senders

Nach (Langley 1998) berechnet sich die maximale Reichweite ( $d$ ) eines UHF- bzw. VHF-Senders in Abhängigkeit der Höhe der Sendeantenne ( $h_t$ ) und der Empfängerantenne ( $h_r$ ):

$$d = 3,57\sqrt{k}(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) \quad (5.1)$$

Der Faktor  $k$  ist eine Funktion der Erdkrümmung und der atmosphärischen Refraktion, er kann für mittlere Breiten mit moderatem Klima mit 1,33 angesetzt werden.

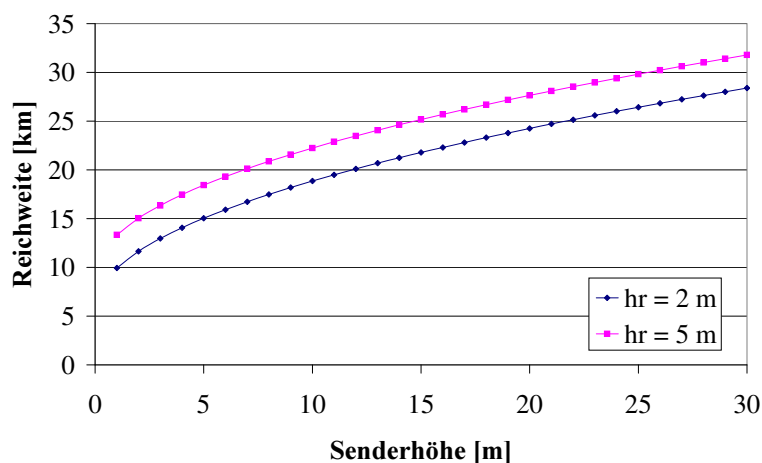


Abbildung 5.3: Maximale Reichweite für UHF- bzw. VHF-Sender in Abhängigkeit der Höhen der Sender- und Empfängerstandorte

Die in Abb. 5.3 dargestellte maximale Reichweite nach (5.1) ist nur zu erreichen, wenn die Radio-sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger und die erste Fresnelzone frei von Hindernissen ist (Martin, Jahn 1998). Hindernisse innerhalb dieser Zone dämpfen die Funksignale (Abb. 5.4).

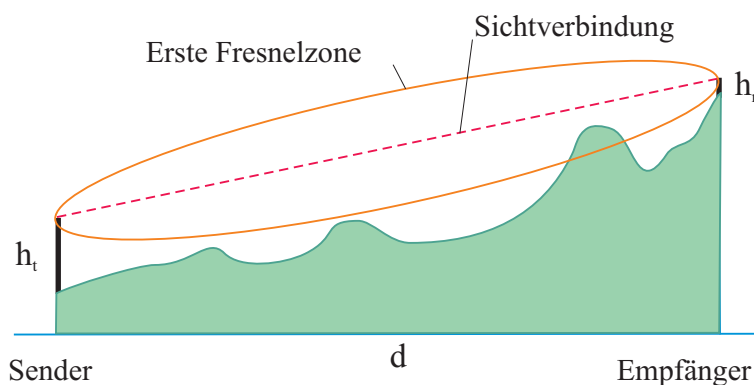


Abbildung 5.4: Modellierung einer Funkverbindung (Martin, Jahn 1998)

In der Praxis liegen die tatsächlich erreichbaren Reichweiten aufgrund der Geländetopographie und vielfältiger Störeinflüsse erheblich unter den theoretischen Werten. Im Rahmen des HPPS-Projektes haben Martin, Jahn (1998) eine Feldstärkeprognose anhand topographischer Daten zwischen den beiden Referenzstationen Clausthal-Zellerfeld und Göttingen berechnet und mit der im Gelände gemessenen Feldstärke verglichen. Nach diesen Untersuchungen beträgt die Reichweite der auf den SAPOS-Stationen eingesetzten VHF-Sender 25–30 km in Abhängigkeit der Geländeoberfläche. Reichweiten von maximal 40 km sind mit exponierten, d.h. in erster Linie hoch über dem Gelände befindlichen, Sende- und Empfangsstandorten erreichbar.

Mit zunehmender Entfernung sinkt die Empfangsfeldstärke, die zusätzlich durch Funkstörungen reduziert wird. Unterschreitet die Empfangsfeldstärke einen Mindestwert beim Empfänger, sind die jeweiligen RTCM-Korrekturdatensätze nicht mehr verwendbar. Sofern die Positionsberechnungen nicht sofort aussetzen, führt das ansteigende Korrekturdatenalter zu einer drastischen Senkung der Positionierungsgenauigkeit.

Mit einer systematischen Funknetzplanung können Feldstärkekarten für ein Bundesland erstellt und so die Senderstandorte optimiert werden. Derartige Karten wurden beispielsweise für Sachsen-Anhalt durch die Landespolizeibehörde oder durch den Hessischen Rundfunk für das Hessische Landesvermessungsamt angefertigt.

Für die Nutzung im SAPOS-Netz stehen der AdV neun Kanäle im Frequenzbereich 160,23–164,89 MHz zur Verfügung. Die zulässige effektive Sendeleistung beträgt im Regelfall 10 Watt (W), in Ausnahmefällen werden auch Einzelgenehmigungen bis maximal 25 W erteilt. Aufgrund der Nachteile gegenüber dem Mobilfunk wird der VHF-Funk innerhalb des SAPOS-Dienstes inzwischen nur noch entlang der Bundeswasserstraßen gewährleistet.

## **5.2.2 Datenfunk im UHF- und VHF-Bereich**

### **5.2.2.1 Betriebs- und Bündelfunk**

Für den Betriebsfunk sind in Deutschland die Frequenzbänder 440–470 MHz (70 cm), 146–174 MHz (2 m) und 68–88 MHz (4 m) reserviert. Zur Nutzung des 70-cm-Bandes im UHF-Bereich reicht eine Typengenehmigung der Funksender und -empfänger mit einer auf 0,25 W begrenzten Sendeleistung aus. Dieser Frequenzbereich wird in kommerziellen RTK-Systemen eingesetzt. Der VHF-Bereich im 2-m- und 4-m-Band kann nur mit einer Zulassung der Regulierungsbehörde für Post und Telekommunikation (RegTP) verwendet werden. In Deutschland wird das 2-m-Band unter anderem für die SAPOS-Dienste eingesetzt, während das 4-m-Band den Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) vorbehalten ist. In Österreich und England steht dagegen auch das 4-m-Band zur Korrekturdatenübertragung zur Verfügung.

Die wesentlichen physikalischen Zusammenhänge der Hochfrequenzsignale im Bereich von 30 kHz bis 300 GHz, die für die Korrekturdatenübertragung zu berücksichtigen sind, fasst (Seeber 2003) zusammen. Hochfrequenzsignale breiten sich danach quasi-optisch geradlinig aus. Mit zunehmender Frequenz sinkt die potentielle Reichweite. Höhere Frequenzen ermöglichen größere Bandbreiten und damit größere Übertragungsraten, erfordern aber auch größere Kanalabstände. Sendeanlagen für hohe Frequenzen sind einfacher und preiswerter aufzubauen als Anlagen für niedrige Frequenzen. Allerdings wird aber aufgrund der geringeren Reichweite eine größere Anzahl an Sendern notwendig. Höhere Frequenzen gewährleisten eine bessere Flächendeckung und sind unanfälliger gegen Interferenzen.

Die in RTK-Systemen eingesetzten UHF-Funkwellen gewährleisten eine gute Überdeckung, bieten aber nur eine geringe Reichweite von wenigen Kilometern, was durch die niedrige Sendeleistung bedingt ist. Sie durchdringen Gebäude und sind für städtische Gebiete gut geeignet. Durch Laub und hohe Luftfeuchtigkeit werden UHF-Wellen dagegen stärker gedämpft. Im Gegensatz zu den früher auf 9.600 bps begrenzten UHF-Funkmodems senden heute in RTK-Systemen eingesetzte Geräte mit Übertragungsraten von 19.200 bps.

Wie die UHF-Signale breiten sich auch VHF-Wellen geradlinig aus, es erfolgen keine Reflexionen an der Ionosphäre. VHF-Signale sind relativ unanfällig gegen Rauschen und Interferenzen und damit zur Datenübertragung gut geeignet. In offenem Gelände erzielen VHF-Wellen deutlich größere Reichweiten als UHF-Signale, sie werden theoretisch nur durch den Radiohorizont begrenzt.

### 5.2.2.2 Digitaler Bündelfunk

Bündelfunknetze sind eine Weiterentwicklung des Betriebsfunks. Die Kommunikationsinfrastruktur einschließlich der Frequenzen werden den verschiedenen Nutzergruppen von einem Betreiber angeboten. Dieser bietet durch einen zellularen Aufbau eine regionale und nationale Überdeckung. Die verfügbaren digitalen Bündelfunknetze basieren auf dem europäischen Standard TETRA (Terrestrial Trunked Radio) und der in Frankreich verbreiteten firmenspezifischen Lösung TETRAPOL. Eine länderübergreifende Zusammenarbeit ist innerhalb Europas trotzdem möglich. Der Vorteil der Bündelfunknetze ist die automatische Zuweisung freier Kanäle an Nutzer. Dies gewährleistet eine optimale Auslastung der verfügbaren Kapazitäten, wodurch das System eine viel größere Zahl an Nutzern versorgen kann, als dies im Betriebsfunk möglich wäre.

Für die allgemeine Nutzung ist der Frequenzbereich 800–900 MHz vorgesehen. Der digitale Bündelfunk nach dem TETRA-Standard ermöglicht die gleichzeitige Sprach- und Datenübertragung. Die Datenübertragung erfolgt paketorientiert im X.25-Standard, mit einer maximale Datenrate von 28.800 bps. Die Sendeleistung beträgt 6 W.

Der Frequenzbereich 380–400 MHz ist für die BOS reserviert. Der für Deutschland bis 2006 vorgesehene flächendeckende Aufbau eines digitalen Funknetzes für die BOS wird aus finanziellen Gründen nicht vor 2010 abgeschlossen sein. In einigen Ballungsräumen und für geschlossene Nutzergruppen, z.B. Flughafen Frankfurt, werden allerdings schon digitale Bündelfunknetze betrieben.

Der Digitalfunk stellt aufgrund der leistungsfähigeren Übertragungstechnik eine attraktive Alternative zum analogen UHF- und VHF-Funk dar. Er kann jedoch mit den in den beiden nachfolgenden Abschnitten beschriebenen terrestrischen Broadcast-Systemen und dem Mobilfunk nur dann konkurrieren, wenn eine größere Flächendeckung erzielt wird. Dies wird jedoch nur mit der geplanten Netzinfrastruktur der BOS erreichbar sein, die eine deutlich bessere Flächendeckung anstreben, als es die Mobilfunknetze zur Zeit gewährleisten. Es ist allerdings sehr zweifelhaft, dass die BOS die Korrekturdatenübertragung auf ihren Frequenzen zulassen.

### 5.2.3 Broadcastsysteme

Korrekturdaten lassen sich grundsätzlich auch über Broadcastsysteme wie Rundfunk und Fernsehen verteilen. Der gut ausgebauten Infrastruktur, die eine kontinuierliche flächendeckende Versorgung gewährleistet, steht allerdings die geringe Bandbreite im Datenkanal der analogen Rundfunk- und TV-Sender gegenüber. So war die Entwicklung eines eigenen Formates RASANT notwendig, um Codekorrekturen über das RDS-System des UKW-Rundfunks ausstrahlen zu können.

Mit dem seit 1986 hauptsächlich für den mobilen Empfang entwickelten digitalen Rundfunk (Digital Audio Broadcast, DAB) können neben dem digitalen Ton weitere digitale Daten in einem der vielen Datenkanäle mit jeweils 8.000 bps übertragen werden. Damit ist auch die Ausstrahlung von Trägerphasenkorrekturen möglich. Anhand der vom Sender mit ausgestrahlten Koordinaten ist eine Unterscheidung regionaler Korrekturdaten möglich. Der Nutzer wählt den jeweiligen regionalen Sender und damit die nächstgelegene Referenzstation.

DAB arbeitet im VHF-Band III (225 MHz) und im L-Band (1452–1492 MHz) (Martin, Jahn 1998). Die GPS-Korrekturdaten werden von der Referenzstation zur jeweiligen DAB-Sendezentrale übertragen, dort in einem Multiplexer in die Lücken im Strom der Audiodaten eingespeist und ausgestrahlt. Aufgrund der Abhängigkeit von der Menge der Audiodaten können die Korrekturdaten nicht kontinuierlich verbreitet werden, ein geringes Datenalter kann so nicht immer gewährleistet werden.

Die Integration der DAB-Korrekturdatenausstrahlung in den SAPOS-Dienst erfolgt in zwei Pilotprojekten in Bayern und Nordrhein-Westfalen. Das Verfahren konnte sich noch nicht durchsetzen, da sich



auch DAB noch immer im Modellversuch befindet. Inzwischen steht es in Konkurrenz zu dem in der Einführung befindlichen digitalen terrestrischen Fernsehen (DVB-T).

Digital Video Broadcasting (DVB) ist ein Verfahren zur Verbreitung digitaler Fernsehprogramme über Satellit (DVB-S), über Kabel (DVB-C) und terrestrische Sender (DVB-T). Für den Korrekturdatenempfang mobiler Empfänger eignet sich DVB-T. Für die Übertragung von DGNSS-Korrekturen wurde der Standard EN 301 192 (DVB specification for data broadcasting) im Rahmen des DVB-T-Projektes Norddeutschland entwickelt. Nachdem DVB-T erstmals im Jahr 2003 in Berlin den Sendebetrieb aufgenommen hat, wird DVB-T gegenwärtig in weiteren Regionen Deutschlands eingeführt und soll bis 2010 das analoge Fernsehen ablösen. Eine Nutzung für den SAPOS-Dienst ist bislang noch nicht vorgesehen.

Für den DVB-Standard spricht die europaweite Verbreitung. Nachteilig ist jedoch, dass DVB-T in Deutschland keine vollständige Flächendeckung erreichen wird. Außerhalb der einwohnerstarken Regionen und der Hauptverkehrswege ist mit größeren Empfangslücken zu rechnen. Damit wird DVB-T in vielen Vermessungsanwendungen nicht nutzbar sein.

#### 5.2.4 Zellulare Kommunikationssysteme

Die mobile Kommunikation wurde in Deutschland mit Einführung eines digitalen Netzes im GSM-Standard (Global System for Mobile Communication) massenhaft verfügbar. Der Mobilfunk gehört zu den zellularen Kommunikationssystemen. Basisstationen im Abstand von wenigen hundert Metern im städtischen Bereich bis maximal 15 km in ländlichen Gebieten versorgen alle Nutzer innerhalb einer Funkzelle. Benachbarte Zellen senden auf unterschiedlichen Frequenzen, um Interferenzen zu vermeiden. Über einen gewissen Abstand hinaus werden die Frequenzen jedoch wiederverwendet, so dass ein relativ kleiner Teil des Frequenzspektrums ausreicht, um beliebig große Gebiete mit Funkzellen abzudecken.

Der digitale Mobilfunk in Deutschland startete 1992 zunächst im Frequenzbereich von 900 MHz (GSM-900-Standard) in zwei D-Netzen. 1999 folgten zwei E-Netze im Frequenzbereich von 1800 MHz. Gegenüber einer Sendeleistung von 2 W in den D-Netzen senden die E-Netze mit nur 1 W. E-Netze erfordern kleinmaschigere Funkzellen, können dafür aber aufgrund der höheren Frequenz mehr Teilnehmer versorgen. In Nordamerika und Japan ist der GSM-1900-Standard verbreitet, d.h. die GSM-Netze senden im Frequenzbereich von 1900 MHz.

GSM ist als leitungsvermittelter Kommunikationsverfahren ausgebaut, für jede Verbindung wird ein eigener Kanal belegt. Es wurde zur Sprachkommunikation entwickelt und sollte das aus dem Festnetz bekannte ISDN in den mobilen Bereich übertragen (Bekkers 2001). Dazu wurde auch die Datenübertragung mit 9.600 bps ermöglicht. Mit verschiedenen Verfahren der Kanalbündelung lässt sich die Übertragungsrate auf 19.200 bps steigern.

Neue Übertragungsverfahren wie GPRS (General Packet Radio Service) und EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) ermöglichen eine deutlich schnellere Datenübertragung mit GSM. GPRS nutzt den Vorteil paketorientierter Verbindungen basierend auf den Internetprotokollen IP und X.25. Dabei wird eine Funkverbindung nicht dauerhaft durch einen Nutzer in Anspruch genommen, sondern nur bei der Übertragung von Datenpaketen. Abgerechnet wird dann nicht mehr die Verbindungsdauer, sondern das übertragene Datenvolumen. Übertragungsraten von etwa 100.000 bps sind realistisch, theoretisch sogar 171.200 bps möglich.

EDGE ist eine von GSM unabhängige Übertragungstechnik, die die GSM-Frequenzen nutzt und abwärtskompatibel zu GSM und GPRS ist. Durch eine neue Modulationstechnik lassen sich hohe Datenraten übertragen, womit EDGE zur Konkurrenz für die neue Mobilfunkgeneration UMTS wird.

UMTS ist die dritte Generation der Mobilfunksysteme, die im Frequenzbereich von ca. 2,2 GHz arbeitet. Konzipiert als paketorientiertes Protokoll werden Sprach- und Datendienste miteinander verschmolzen.

Mobile Internetdienste können integriert werden. UMTS ist seit 2004 in bestimmten Regionen Deutschlands zur Datenübertragung nutzbar. Der bundesweit vollständige Ausbau der Netze und Dienste wird nicht vor 2008 abgeschlossen sein.

Die höchste Datenübertragungsrate von bis zu 2 Mbps wird nur bei einer Bewegungsgeschwindigkeit deutlich unter 10 km/h, einer sogenannten Pikozone, erreicht. Nutzer, die sich bis zu 120 km/h schnell bewegen (Mikrozone), erzielen nur eine Übertragungsrate von 384 kbps. Analog zum GPRS werden übertragene Datenpakete und nicht die Verbindungsdauer abgerechnet. UMTS ist grundsätzlich auch zur Korrekturdatenübertragung geeignet, angesichts der hohen Datenrate können zukünftig Korrekturdaten aller GNSS-Systeme problemlos übertragen werden.

### 5.2.5 Echtzeitdatenübertragung per Internet

Das Internet ermöglicht Datenübertragungen zwischen unabhängigen Computern über eine Vielzahl von weltweiten Datennetzverbindungen. In standardisierten Protokollen, im wesentlichen der TCP/IP-Protokollfamilie, sind die Adressierung der Computer und alle hard- und softwareseitigen Anforderungen für die Datenkommunikation definiert, so dass die Kommunikation unabhängig von Betriebssystemen und Netzwerktechnologien möglich ist. Für solche Open Systems Interconnections (OSI) hat die International Standardization Organisation (ISO) 1977 ein Referenzmodell mit sieben Schichten entwickelt. Vier der sieben Schichten haben eine transportorientierte Funktion, die anderen drei eine datenverarbeitungsorientierte Funktion (Alex, Bernör 1994). Ein vereinfachtes vierstufiges, an das TCP/IP-Protokoll angelehntes Schichtenmodell ist in Abb. 5.5 dargestellt. Unabhängig von der physikalischen Schicht, in der die Daten real transportiert werden, regelt das IP-Protokoll das Routing der Daten im weltweiten Netzwerk. Die TCP (Transport Control Protocol)- und UDP (User Datagram Protocol)-Protokolle sorgen für die Aufteilung der zu übertragenden Daten in kleine Datenpakete und deren Versendung an die richtige Zieladresse. Die Anwendungsebene stellt schließlich die Schnittstelle dar, über die Nutzer die verschiedenen Internetdienste einsetzen können.

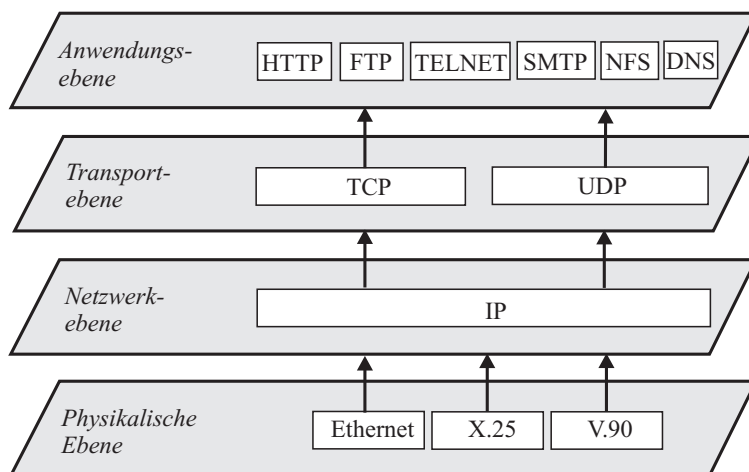


Abbildung 5.5: Vereinfachte Struktur der Internetprotokolle nach dem OSI-Schichtenmodell

Bereits seit mehr als zehn Jahren können über das Internet GPS-Informationen wie z.B. Orbits und Satellitenuhrinformationen heruntergeladen werden, die u.a. vom IGS oder dem GPS Informations- und Beobachtungssystem (GIBS) des heutigen Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) bereitgestellt werden. Wegen der Unabhängigkeit der OSI-Schichten können Nutzer zwischen verschiedenen leitungsgebundenen Internet-Zugangstechnologien (analoge Telefonleitung, ISDN, Glasfaser, Breitbandanschluss, Kabelfernsehen), aber auch funkbasierten Lösungen (Mobilfunk, WLAN) für mobile Anwen-

dungen auswählen. Nachdem bereits Radio- und Fernsehprogramme über das Internet ausgestrahlt werden, bietet sich auch die Echtzeitkorrekturdatenübertragung über das Internet an. Grundsätzlich ist dazu nur ein TCP-Server notwendig, der auf Anforderung von TCP-Clients Daten überträgt. Dieses Verfahren ist allerdings nicht für den massenhaften Datenabruf geeignet. Beispiele für Korrekturdatenangebote im Internet sind NTRIP (BKG), IGDG (JPL) und SISNeT (ESA), die nachfolgend kurz erläutert werden.

Die Echtzeitdatenübertragung kann im Internetprotokoll als bidirektionale Kommunikation zwischen zwei Rechnern (Unicast) mit dem verbindungsorientierten TCP-Protokoll oder als unidirektionale Kommunikation (Multicast) mit dem UDP-Protokoll realisiert werden (Gebhard 2003). Für eine möglichst weite, ungestörte Datenübertragung kann gegenwärtig nur die Unicast-Kommunikation mit dem TCP-Protokoll erfolgen. Internetverbindungen per Mobilfunk (GSM, GPRS, UMTS) unterstützen keine IP-Multicast-Dienste und die ungesicherte UDP-Übertragung wird durch Firewalls und Proxyserver aus Sicherheitsgründen blockiert.

Das BKG hat in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Kommunikationstechnik an der Universität Dortmund ein Konzept zum Transport von RTCM-Korrekturdaten über das Internet (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP)) entwickelt, um Daten der GNSS-Referenzstationen des German GPS Reference Network (GREF) und des EUREF Permanent Network (EPN) in Echtzeit möglichst vielen Nutzern verfügbar zu machen. Zur Zeit wird ein NTRIP-Caster vom BKG betrieben. Weitere europaweit verteilte Broadcaster sind geplant (Dettmering 2003).

NTRIP ist ein eigenes, in Anlehnung an HTTP entwickeltes Protokoll, der Grundlage der meisten Dienste in der bekanntesten Internetanwendung, dem World Wide Web. Um Sicherheitsrisiken auszuschließen und die ungestörte weltweite Kommunikation zu gewährleisten, ist NTRIP in der vom BKG realisierten Version dreistufig aufgebaut (Gebhard, Weber 2003). Ein NTRIP-Caster (auch Broadcaster genannt) bildet die Schnittstelle zwischen den Datenquellen (GPS-Referenzstation oder Vernetzungszentrale) und den Datenempfängern (Nutzern). Aus Sicherheitsgründen wird keine direkte Kommunikation zwischen den NTRIP-Clients und den NTRIP-Quellen zugelassen. Die zwischengeschalteten NTRIP-Server (Abb. 5.6) leiten die von den GPS-Referenzstationen oder aus einer Vernetzungsberechnung kommenden Daten kontinuierlich an den NTRIP-Caster weiter. Autorisierte Nutzer (NTRIP-Clients) rufen den gewünschten Datenstrom mittels einer Source-ID ab, die einer Übersicht der abrufbaren Echtzeitdaten (Source Table) zu entnehmen ist. Die Anmeldung der Nutzer erfolgt über eine entsprechende NTRIP-Schnittstelle, ebenso wie die Systemadministration. Im Gegensatz zur BKG-Lösung sieht die NTRIP-Spezifikation nach dem RTCM Version 3 Standard nur einen zweistufigen Aufbau vor, bei dem Server und Caster identisch sind.

Neben reinen code- und trägerphasenbasierten RTCM-Korrekturdaten können weitere Daten über den NTRIP-Caster bereitgestellt werden, wie beispielsweise Rohdaten, RTCA-Daten oder EGNOS-Korrekturdaten. Eine weitergehende Nutzung beschreibt Wübbena (2003), der Zustandsinformationen mit Hilfe von NTRIP verteilt. Zusätzlich zu den Korrekturdaten können beliebige Informationen mit dem Echtzeitdatenstrom verbreitet werden, z.B. Geobasisdaten.

Für die Qualität eines Referenzstationsdienstes sind eine möglichst hohe Verfügbarkeit der Korrekturdaten und möglichst kurze Laufzeiten wichtig. Fehlende oder fehlerhafte Korrekturdaten schränken die Verfügbarkeit von Echtzeitleösungen ein, längere Laufzeiten reduzieren die Genauigkeit der Echtzeitleösungen. Für den NTRIP-Caster wurden bislang Ausfallzeiten von unter 3% registriert (Dettmering 2003). Bei den Datenquellen beträgt die Verfügbarkeit abhängig vom Provider 95% bis über 99%.

Laufzeitverzögerungen treten bei der Echtzeitdatenübertragung per Internet jeweils an den Internetzugängen der Provider, des NTRIP-Casters und der Nutzer durch zu geringe Bandbreiten und hohe Netzauslastungen auf. Nach einer Untersuchung von Dettmering (2003) bleiben 95% der Laufzeiten über das Internet unterhalb einer Sekunde, der Datenabruf per Mobilfunk durch den Nutzer dauerte durchschnittlich 0,4 Sekunden. Hinzugerechnet werden muss die Zeit für die Vernetzungsberechnung. Für Trägerphasenkorrekturen ergeben sich deshalb Laufzeiten von bis zu 2,5 Sekunden.

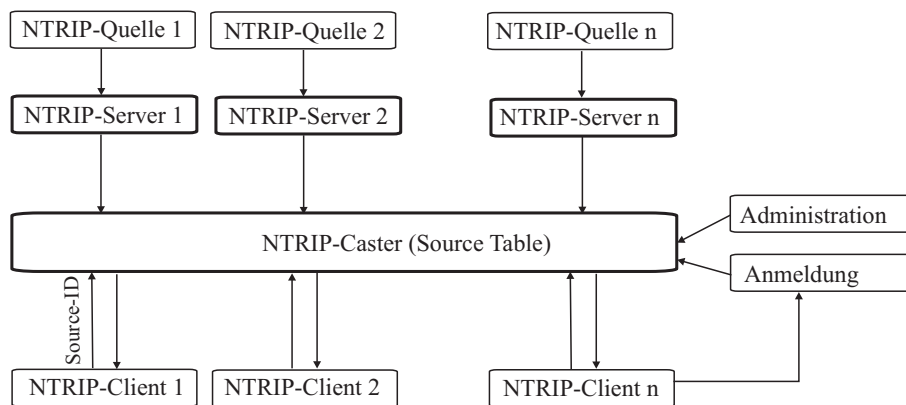


Abbildung 5.6: Datenströme im NTRIP-Konzept (nach Gebhard, Weber 2003)

Die Eigenart der paketbasierten Internetkommunikation bedingt, dass weder die vollständige noch schnelle Übertragung von zeitkritischen Korrekturdaten garantiert werden kann. Der Weg und die Reihenfolge der Datenpakete kann nicht gesteuert werden. Hohe Netzlasten oder Ausfälle von Verbindungen können zu unabsehbaren Laufzeitverzögerungen mit den entsprechenden Folgen für die Positionierungsgenauigkeit führen. Für einen präzisen und zuverlässigen internetbasierten Positionierungsdienst müssen Laufzeiten von 1 bis 1,5 Sekunden und Ausfallzeiten von unter 1% gewährleistet werden. Abschließend stellt auch der Internetzugang eines mobilen Nutzers einen Risikofaktor dar, da die verschiedenen Mobilfunknetze keine vollständige Flächendeckung gewährleisten können oder eine schlechte Empfangsqualität den Korrekturdatenempfang verhindert.

Die Echtzeitdatenübertragung über Internet bietet den Referenzdienstbetreibern Vorteile durch die Verwendung standardisierter Datenformate, Protokolle und allgemein verfügbarer Kommunikationsinfrastrukturen. Seine Aufgabe reduziert sich auf die Einspeisung der Daten in das Internet. Damit verliert der Referenzdienstbetreiber aber zugleich alle Einflußmöglichkeiten auf die vollständige und rechtzeitige Verteilung der Korrekturdaten bis zum Nutzer. Für den Nutzer wird der Abruf von Internetdaten dann günstiger, wenn wie bei GPRS und UMTS die übertragene Datenmenge statt der Online-Verbindungszeit abgerechnet wird, da die GNSS-Korrekturdaten nur verhältnismäßig geringe Datenmengen umfassen.

Neben dem Dienst des BKG werden weitere echtzeitfähige Internetangebote vom JPL und der ESA bereitgestellt. Das JPL nutzt das Internet zur Übertragung der Beobachtungen des NASA Global GPS Networks (GGN) zu den Rechenzentren, wo Differentialkorrekturen als Verbesserungen zu den Bahn- und Satellitenuhrparametern der Broadcast Ephemeriden berechnet werden. Die Korrekturen werden im Takt von einer Sekunde mit einer Datenrate von 352 bps, ausreichend für eine Subdezimeterauflösung, über einen TCP-Server über das Internet frei an autorisierte Nutzer verteilt. Zusätzlich werden die Korrekturdaten über die drei Inmarsat-Kommunikationssatelliten im L-Band ausgestrahlt.

Als SISNeT (Signal-in-Space through the Internet) bezeichnet die ESA die Verbreitung von EGNOS-Korrekturdaten über das Internet. Es fallen nur geringe Datenmengen an (1 message/s = 250 bps), da nur Codekorrekturen zu übertragen sind. Zusätzlich ist die Ausstrahlung über FM-Radio und GSM geplant. Die von den geostationären Inmarsat-Satelliten ausgestrahlten EGNOS-Korrekturdaten sind aufgrund des niedrigen Elevationswinkels nicht überall in Mitteleuropa, insbesondere in Städten, empfangbar. Die ESA betreibt die Entwicklung spezieller SISNeT-Empfänger, bestehend aus einem Handheld-GPS-Empfänger und einem GSM/GPRS-Modem auf der Basis von PDAs. Aufgrund des verwendeten Protokolls müssen die Korrekturdaten von einem Nutzer ständig angefragt werden, es erfolgt keine permanente automatische Ausstrahlung (SISNeT 2003).

### 5.2.6 Vergleich der Kommunikationslösungen

Zur Realisierung der Kommunikationskomponente in lokalen und regionalen Referenzstationsnetzen bieten sich Datenfunksysteme und Mobilfunksysteme an. Satellitenkommunikationssysteme sind nur für Referenznetze kontinentalen Ausmaßes interessant, die Einspeisung der Korrekturdaten ist mit einem hohen Aufwand und hohen Kosten verbunden. Die bisherigen analogen Broadcastsysteme verfügen über keine ausreichende Bandbreite zur Übertragung präziser Korrekturdaten. Dies ändert sich mit der Einführung digitaler Verteilsysteme wie DAB und DVB. Jedoch geht der Ausstrahlung der Korrekturdaten ein langwieriger Abstimmungsprozess mit den Rundfunkanstalten voraus, handelt es sich doch um nur eine nachrangige Nutzung unter vielen anderen.

Zu den Vorteilen der Datenfunksysteme gehört, dass nach Zuteilung exklusiver Frequenzen in ausreichender Anzahl ein Betriebsfunknetz z.B. im 2-m-Band bedarfsorientiert ausgebaut werden kann. Problematisch ist jedoch der hohe Aufwand für eine vollständige Flächendeckung, die für einen Positionierungsdienst letztendlich angestrebt werden muss. Die dafür notwendigen, möglichst hohen Senderstandorte sind nur schwierig zu bekommen. Für den Betreiber fallen hohe Anfangsinvestitionen und Betriebskosten an, Nutzer benötigen spezielle Kommunikationsendgeräte, die nicht für andere Dienste genutzt werden können und aufgrund geringer Stückzahlen in der Anschaffung teuer sind. Angesichts der Investitionen in spezialisierte Systeme kann man den schnellen technischen Weiterentwicklungen kaum folgen. Dass im Vergleich zum Mobilfunk keine laufenden Übertragungskosten anfallen, rechnet sich nur für Dauernutzer eines Positionierungsdienstes.

Setzt ein Referenznetzbetreiber dagegen Mobilfunk als Kommunikationskomponente ein, übernimmt der darauf spezialisierte Mobilfunkanbieter den Infrastrukturaufwand. Der Referenznetzbetreiber muss nur eine ausreichende Anzahl von Telefonanschlüssen für seine Nutzer zur Verfügung stellen. Für den Nutzer entstehen nur geringe Anschaffungskosten, allerdings beteiligt er sich mit höheren Verbindungskosten an den Infrastrukturkosten.

Die zukünftige Entwicklung des Kommunikationssegmentes wird bestimmt durch digitale Funkübertragungsverfahren und das Verschmelzen von Mobilfunk und mobilem Internet. Die Echtzeitdatenübertragung per Internetprotokoll wird in Verbindung mit dem Mobilfunk zukünftig Standard werden. In einer dazu parallelen Entwicklung wird die Mobilkommunikation um eine Positionierungskomponente erweitert. Unsicherheitsfaktoren stellen die weiteren Steigerungsraten der Internetnutzungen und die damit verbundene Netzauslastung sowie die Kostenentwicklung für die Internetnutzung dar. Nicht zuletzt sind auch die Schwierigkeiten zu berücksichtigen, die Sicherheit bei Internetanwendungen zu gewährleisten. Gegen den Mobilfunk sprechen nur die verbleibenden Lücken in der Flächendeckung, insbesondere in abgelegenen ländlichen Bereichen. Eigene Kommunikationssysteme zur Korrekturdatenübertragung wie der 2-m-Funk haben aufgrund des hohen Kostenaufwandes für den Dienstbetreiber sicherlich langfristig keine Zukunft. Eingebunden in die Datenströme anderer digitaler Broadcast- und Funkkommunikationssysteme werden allerdings auch die terrestrischen Funklösungen wieder interessant, z.B. bei Nutzung von DAB oder DVB-T sowie TETRA.

Auch für die Zukunft wird es sinnvoll sein, mehrere Kommunikationswege zur Korrekturdatenübertragung zur Verfügung zu stellen, um der Vielfalt an Anwendern eine möglichst flächendeckende Nutzung zu ermöglichen.

### 5.2.7 Kommunikationslösungen für Brasilien

Die vorhergehende Übersicht behandelt in allgemeiner Form Kommunikationslösungen, die in Deutschland im Rahmen des SAPOS-Dienstes eingesetzt werden, deren Einsatz für die Zukunft angestrebt wird oder sinnvoll wäre. Vergleichbare Kommunikationssysteme stehen auch in den meisten anderen Ländern zur Verfügung, unterscheiden sich aber erheblich im Ausbau- und Entwicklungszustand sowie in den

technischen Spezifikationen. Zudem sind die unterschiedlichen gesetzlichen Regelungen zu beachten, denen das Funkwesen weltweit unterliegt. Nicht zuletzt die Kostenstrukturen können in einem Land den Ausschlag für die Wahl einer Kommunikationslösung geben. Exemplarisch wird an dieser Stelle nur auf die Möglichkeiten zur Korrekturdatenübertragung in Brasilien eingegangen, weil dort in zwei Projekten jeweils eine Referenzstationsvernetzung betrieben wurde.

Brasilien verfügt über eine Reihe von regional begrenzten Betriebsfunknetzen und eine vergleichsweise gut ausgebaute Mobilfunkinfrastruktur, allerdings waren beide Kommunikationswege bislang nicht für die digitale Datenkommunikation geeignet. Die beiden vorherrschenden Mobilfunksysteme TDMA (Time Division Multiple Access) und FDMA (Frequency Division Multiple Access) im Frequenzbereich von 800 MHz und 1900 MHz nach U.S. amerikanischen Standard erlauben keine Korrekturdatenübertragung. Diese ist erst mit Einführung des GSM ab dem Jahr 2002 in den Bundesstaaten Paraná und Pernambuco möglich geworden. Explizite Datendienste wie GPRS werden gegenwärtig eingeführt, womit die Korrekturdatenübertragung per Internet möglich wird. Als Alternative zu den Mobilfunkdiensten bleibt somit nur der Betrieb eigener Datenfunksender im VHF- oder UHF-Band, wie sie für die Projekte temporär aufgebaut wurden.

### 5.3 Aufbau von Referenzstationen

Eine GPS-Referenzstation in einem Echtzeitreferenznetz besteht mindestens aus einem geodätischen GPS-Empfänger mit Antenne, einer Kommunikationseinrichtung, einem Rechner und der Stromversorgung (Abb. 5.7). Die Komponenten können teilweise oder ganz in einem Gerät integriert sein, werden im folgenden aber als getrennte Module behandelt. Weitere optionale Module sind ein Frequenznormal oder meteorologische Sensoren, die jedoch wegen der hohen Kosten oder der kaum verwendbaren Informationen selten eingesetzt werden.

Eine vollständige Beschreibung der Ausstattung müsste auch Details der Stromversorgung, der Schnittstellen und der Verkabelung der Systemkomponenten umfassen, die für die praktische Arbeit gerade in internationalen Projekten entscheidend sein können. Im Zusammenhang mit den grundlegenden Betrachtungen dieser Arbeit sind sie jedoch nicht relevant, weshalb auf eine Beschreibung verzichtet wird.

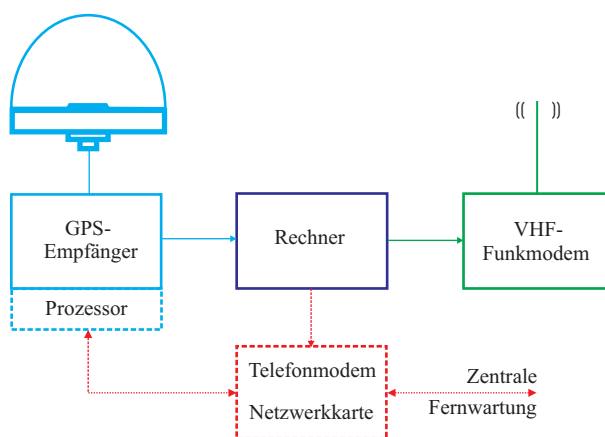


Abbildung 5.7: Systemkomponenten einer Referenzstation

Referenzstationen sollten mit geodätischen Zweifrequenzempfängern ausgestattet sein. Die beiden Trägerphasen L1 und L2 sind zur Schätzung der ionosphärischen Laufzeitverzögerung und zur schnelleren Mehrdeutigkeitslösung essentiell. Die Empfangseinheit sollte über 12 Kanäle verfügen, um die maximale Anzahl der sichtbaren Satelliten empfangen zu können. Die Rekonstruktion des P-Codes ist notwendig, um schnelleren Zugang zu L2 mit voller Wellenlänge zu gewähren.

Nur hochwertige geodätische Antennen mit möglichst stabilem symmetrischen Phasenzentrum und einer wirksamen Abschirmung gegen Mehrwegeausbreitung sollten auf Referenzstationen zum Einsatz kommen. Empfehlenswert sind Choke-Ring-Antennen. Für die Phasenzentren der Antennen sollten zumindest Korrekturwerte aus Typkalibrierungen vorliegen, besser noch aus individuellen Absolutkalibrierungen. Bei den Wetterschutzhauben der Choke-Ring-Antennen ist deren Einfluss auf das Antennenphasenzentrum zu beachten. Alle Kabel und Kabelverbindungen müssen dem Dauerbetrieb entsprechend wetterfest ausgestattet sein.

Die vom Empfänger registrierten Rohbeobachtungen werden über genormte Schnittstellen auf den Rechner übertragen. Dieser berechnet für den lokalen Referenzstationsbetrieb RTCM-Korrekturdaten und stellt sie über die Kommunikationseinrichtung lokalen Nutzern dieser Station zur Verfügung. Für die Vernetzung werden zumindest die RTCM-Daten zur Vernetzungszentrale übertragen. Umgekehrt empfängt der Rechner bei dezentraler Korrekturdatenausstrahlung die Vernetzungsparameter, die zusammen mit den lokalen Korrekturen ausgestrahlt werden. Als Teil der Datensicherung werden entweder die Rohdaten oder komprimierte RINEX-Daten auf dem Rechner zwischengespeichert, bis sie der Zentrale übermittelt werden. Referenzstationsempfänger benötigen kein Bedienfeld mehr, sie werden vom Rechner aus gesteuert, über den auch die Fernwartung des Empfängers erfolgen kann.

Kontinuierliche GPS-Beobachtungen erfordern für den Datentransfer und die -archivierung eine Planung des anfallenden Datenvolumens (Abb. 5.8). Optimale Beobachtungsbedingungen (7 Beobachtungsgrößen, 1 Hz Aufzeichnungsrate, 0° Elevation, 10 Satelliten) vorausgesetzt, fallen pro Stunde etwa 4 MB an RINEX-Daten (rxo, rxn) je Referenzstation an. Durch Umwandlung in das Compact-RINEX-Format nach dem Algorithmus von Hatanaka (1998), der ausgehend von den Beobachtungen der ersten gespeicherten Epoche nur die Beobachtungsdifferenzen zwischen den Epochen abspeichert, lässt sich die Dateigröße um  $\frac{2}{3}$  reduzieren. Eine weitere Reduktion auf rund 12% der Größe der Ausgangsdatei lässt sich durch eine Kompression der CRINEX-Datei mit dem international akzeptierten und auf fast allen Betriebssystemen verfügbaren Programm compress erreichen. Die reduzierten und komprimierten RINEX-Beobachtungen (rxs, rxx) benötigen somit nicht mehr Speicherplatz als die Aufzeichnung des binären RTCM-Datenstroms (rcm), der etwa 0,5 MB Speicherplatz je Stunde und je Station erfordert. Protokoll- und weitere Ausgabedateien können vernachlässigt werden. Bei vier Referenzstationen ergibt dies pro Monat 6,4 GB und bei rund 260 SAPOS-Referenzstationen sind somit jährlich rund 1 Terabyte an Beobachtungsdaten zu archivieren.

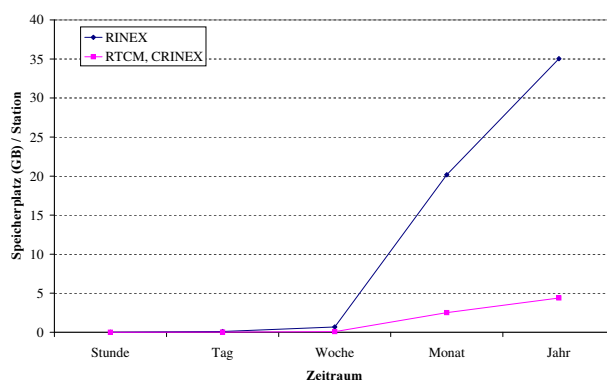


Abbildung 5.8: Speicherplatzanforderungen für 1 Hz RINEX- und RTCM-Beobachtungen einer Referenzstation

Für die Echtzeitpositionierung wird eine der in Kap. 5.2 beschriebenen Kommunikationseinrichtungen benötigt. In RTK-Systemen werden UHF-Funkmodems im 70-cm-Band eingesetzt, die nur über eine geringe Reichweite verfügen. In regionalen Netzen wie dem SAPOS-Netz bieten VHF-Funkmodems deutlich größere Reichweiten, die gut mit den maximalen Entfernungen für die PDGPS-Positionierung mit nur einer Referenzstation korrespondieren. Das Kommunikationssystem besteht aus einem mit dem

Rechner verbundenen Funkmodem und einer Funkantenne. Wie bei der GPS-Antenne kommt es für eine gute Sende- und Empfangsleistung auf einen exponierten, möglichst hohen Standort an. Die Standorte der GPS-Antenne und der Funkantenne können räumlich getrennt sein, solange der Korrekturdatenfluss ohne wesentliche Zeitverzögerung gewährleistet ist. Aufgrund des geringeren Aufwandes für die Kommunikationsinfrastruktur hat sich in den letzten Jahren die Nutzung des zellularen GSM-Mobilfunks gegenüber dem Datenfunk durchgesetzt.

Unabhängig vom Kommunikationsmedium für die Echtzeitkorrekturdatenausstrahlung wird zu jeder Referenzstation eine Kommunikationsverbindung benötigt, die aus einer Richtfunk- oder Mobilfunkverbindung, einer Festnetztelefon- oder Datennetzverbindung (Internet, Behördliches Landesdatennetz oder Firmeneigene Kommunikationsnetze) bestehen kann. Zum einen sind die Korrekturdaten von der Referenzstation zur Zentrale zu übertragen und die Vernetzungsparameter wieder zurück an die einzelnen Referenzstationen. Zum anderen müssen die lokalen archivierten Beobachtungen eingesammelt werden. Weiterhin ist es notwendig, die Referenzstationen aus der Ferne warten und steuern zu können, was sich über eine Internetverbindung gut lösen lässt.

Alle elektrischen und elektronischen Komponenten benötigen eine permanente und sichere Spannungsversorgung. Stromausfälle und Überspannungen, z.B. durch Blitzeinschlag, können zu erheblichen Schäden an den Bauteilen führen und den Ausfall von Referenzstationen nach sich ziehen. Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV) gehören daher zur Pflichtausstattung von Referenzstationen. Nicht zu unterschätzen ist auch die Wärmeentwicklung der elektrischen Bauteile, die besonders im Dauerbetrieb richtig abgeführt werden muss. Dies ist oftmals schwierig, wenn die Module an einem Standort kompakt untergebracht werden müssen und die exponierten Standorte selbst einer starken Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind.

Dem hier beschriebenen Aufbau entsprechen auch die multifunktionalen Referenzstationen des SAPOS-Dienstes. Wie im Bericht der AdV-Expertengruppe „GPS-Referenzstationen“ dokumentiert (AdV 1998), können zur Ausrüstung noch zusätzlich Module hinzukommen, die mit der Korrekturdatenausstrahlung mit verschiedenen Kommunikationsmedien sowie mit der Abrechnung der Dienstleistungen zusammenhängen. Weitergehende Anforderungen an die redundante Ausrüstung jeder Referenzstation, wie noch im HPPS-Projekt gefordert (Jahn 1996), wurden praktisch nicht umgesetzt. Eine exakte Definition und Dokumentation der Referenzstationsausrüstungen sowie der Datenverarbeitung auf den Stationen wird dann erforderlich, wenn in einem Referenzdienst Daten von Referenzstationen unterschiedlicher Betreiber einfließen. Neben der Zusammenarbeit von SAPOS mit dem privaten Positionierungsdienst ascos sei auf die Selektionskriterien des U.S. National Geodetic Survey (NGS) für die kontinuierlich operierenden Referenzstationen (Continuous Operating Reference Stations (CORS)) hingewiesen, die von einer Vielzahl von Institutionen betrieben werden. Die Selektionskriterien (CORS 1999) schreiben die Mindestanforderungen vor, von deren Erfüllung die Aufnahme in das CORS-Netz abhängt. Sie erstrecken sich über den Referenzstationsbetreiber und die Finanzierung des Betriebs, den Standort und die Ausrüstung, die Kommunikationsverbindungen, die Datenverarbeitung sowie die Einbindung in das Bezugssystem. Weitergehende Anforderungen sind als bevorzugt (z.B. netzunabhängige Spannungsversorgung für mindestens sechs Stunden, Archivierungssystem, Diebstahlsicherungen) oder als wünschenswert (z.B. Ausstattung mit meteorologischen Sensoren oder Zeitnormalen) aufgelistet.

#### **5.4 Aufbau einer Nutzerstation**

Die Ausrüstung eines Nutzers eines Positionierungsdienstes besteht grundsätzlich aus den gleichen Komponenten wie eine Referenzstation, einem GPS-Empfänger mit Antenne, einer Kommunikationseinrichtung, einem Rechner und der Stromversorgung (Abb. 5.9). Die Ausrüstung muss jedoch kompakt und leicht sein, um dem Nutzer eine hohe Mobilität zu ermöglichen. Eine solche mobile Nutzungseinheit



wird auch als Rover bezeichnet, unabhängig davon, ob sie kinematisch, d.h. in der Bewegung, oder statisch arbeitet.

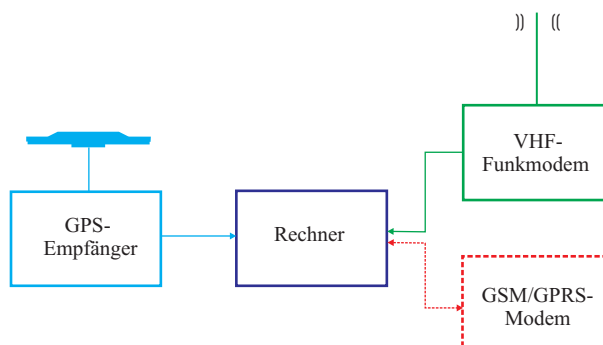


Abbildung 5.9: Systemkomponenten einer Nutzerausrüstung

Zur schnellen Mehrdeutigkeitslösung empfiehlt sich für den Rover ebenfalls ein geodätischer Zweifrequenzempfänger. Eine hochwertige Signalverarbeitung ermöglicht dem Empfänger, auch stärker gedämpfte Signale in schwierigen Umgebungsbedingungen noch zu empfangen. Für den Rover genügt eine kompakte typkalibrierte Antenne.

Die Korrekturdaten werden über einen VHF-Funkempfänger mit Antenne oder über GSM-Mobilfunk in Form eines normalen Mobilfunktelefons oder eines Mobilfunkmodems empfangen. Das Mobilfunkmodem kann im GPS-Empfänger oder im angeschlossenen Rechner integriert sein. Bei dem Rechner handelt es sich entweder um einen zum GPS-Empfänger gehörenden, externen Controller oder einen Feldrechner in Form eines Notebook oder eines Tablett-PC.

Für die weitere Verwendung der vom Rover berechneten Positionen in einem Tachymeter, z.B. bei Ingenieur- oder Liegenschaftsvermessungen, oder anderen Sensoren, z.B. bei hydrographischen Anwendungen, muss der automatische Datenfluss per Kabel- oder Funkverbindung (Bluetooth) hergestellt werden.

Aufgabe der Rover-Software ist zunächst die Berechnung einer präzisen differentiellen Positionslösung unter Berücksichtigung der Vernetzungsparameter beziehungsweise virtueller Referenzstationsdaten. Dazu ist eine herkömmliche RTK-Software erst nach Anpassungen für Referenznetze und den damit verbundenen Lösungsansätzen über größere Abstände zu den Referenzstationen in der Lage. Zur schnellen Mehrdeutigkeitslösung auch in der Bewegung muss die Rover-Software über die Fähigkeit zur Mehrdeutigkeitslösung „on the fly“ (OTF) verfügen.

Da mit der Positionslösung die Arbeit eines mobilen Nutzers oftmals erst beginnt, sind weitere Softwaremodule erforderlich, die zur Datums- und Koordinatentransformation, zur Koordinatenumformung und zur Berechnung von Geoidundulationen, um Schwerefeldhöhen abzuleiten, notwendig sind. Eine umfassende Punktverwaltung mit graphischen Darstellungsmöglichkeiten ist zum effektiven Arbeiten im Außendienst ebenfalls erforderlich.

Für den praktischen Einsatz im Feld letztendlich bedeutend ist die Leistungsfähigkeit der Akkus und die Robustheit der gesamten Ausrüstung, die bei möglichst geringem Gewicht stoßfest, wasserfest und in einem weiten Temperaturbereich funktionsfähig sein muss. Ein grundsätzliches Problem ist auch die Lesbarkeit der Computerdisplays bei Sonneneinstrahlung.

## 5.5 Anforderungen an Positionierungsdienste

### 5.5.1 Standorte von Referenzstationen

Die Standorte von Referenzstationen werden unter wirtschaftlichen und logistischen Gesichtspunkten gewählt. Ein Referenznetz muss ein Gebiet mit möglichst wenigen Referenzstationen abdecken. Die Referenzstationen sollten für den Dienstbetreiber für Wartungsarbeiten schnell erreichbar sein.

Die Referenzstationsstandorte müssen über eine möglichst freie Horizontsicht verfügen, über einen langen Zeitraum zu möglichst geringen Kosten nutzbar sein und stabil stehen, sowie über die notwendige Infrastruktur verfügen. Die Möglichkeit zur sicheren Unterbringung der Referenzstationsausrüstung und die Verfügbarkeit von Strom- und Telefon- bzw. Internetanschlüssen führen in der Regel zur Einrichtung von Referenzstationen auf Verwaltungsgebäuden. Diese Standorte sind allerdings nicht immer stabil und oftmals durch Mehrwegereflexionen an den Dachaufbauten beeinträchtigt. Eine kostenträchtigere Alternative stellen speziell für Referenzstationen errichtete Pfeiler dar, wie sie in Japan in größerer Zahl zum Einsatz kommen.

Angaben zum Standort und zur Ausrüstung von Referenzstationen müssen sorgfältig dokumentiert werden. Insbesondere jede Änderung, die die Position einer Referenzstation beeinflusst (z.B. Pfeilerwechsel, Antennenwechsel), muss langfristig nachvollziehbar sein. Es empfiehlt sich die Nutzung standardisierter Protokolle, wie sie beispielsweise im IGS genutzt werden (IGS Site Log).

### 5.5.2 Komponenten eines Positionierungsdienstes

Zu den wichtigsten Komponenten eines Referenzstationsnetzes als Teil eines Positionierungsdienstes gehören zunächst die Referenzkoordinaten, die durch das elektromagnetische Phasenzentrum der GPS-Referenzstationsantenne repräsentiert werden. Sie sind die Schnittstellen zum Raumbezugssystem und bezogen auf diese Koordinaten werden die Korrekturdaten der Referenzstationen berechnet. Alle Veränderungen dieser Koordinaten sind vom Positionierungsdienst zu erfassen und im Auswerteprozess zu berücksichtigen. Weiterhin gehören die Hardware (GPS-Empfänger und Antennen), die technische Infrastruktur der Referenzstationen und die Standorte selbst zu den wesentlichen Komponenten.

Der Kern eines Positionierungsdienstes ist das Rechenzentrum, dessen Systemkomponenten Abb. 5.10 zeigt. Das Zentrum verfügt über Kommunikationsverbindungen zu allen Referenzstationen und zu externen Datenlieferanten, wenn beispielsweise IGU-Bahndaten verwendet werden. Für unterschiedliche Nutzeranforderungen werden Korrekturdaten über verschiedene Kommunikationsmedien verteilt. Ein Zentralrechner führt die Multistationsauswertung durch und berechnet die Vernetzungsparameter. Dafür muss eine Datenbank mit allen Informationen über die Referenzstationen zur Verfügung stehen, aus der die Referenzkoordinaten und Antennenkalibrierwerte gelesen werden. Die einfache Darstellung kann durch Backup-Systeme, unterbrechungsfreie Stromversorgungen und Archiv-Server beliebig erweitert werden. Um zu den Korrekturdaten auch ergänzende Informationen für die Nutzer bereitzustellen, ist die Verknüpfung mit Geodaten-Servern und verschiedensten Datenbanken möglich.

Die logistischen und administrativen Komponenten des Referenzdienstes werden ebenfalls von der Zentrale aus gesteuert. Sie umfassen Fragen der Integritätsprüfung, Alarmpläne bei Fehlfunktionen, eine Planung der Systemzeiten für z.B. Wartungsarbeiten, sowie die Datensicherung und -archivierung. Zu den administrativen Aufgaben gehört die Finanzierungs- und Zeitplanung für die Erneuerung des gesamten Referenzstationensystems einerseits und die gesamte Nutzerverwaltung und -abrechnung andererseits.

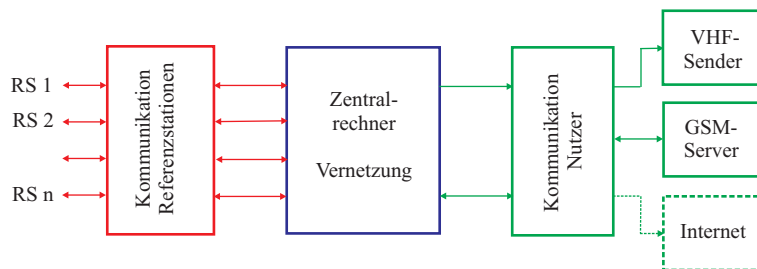


Abbildung 5.10: Systemkomponenten einer Referenznetzzentrale

### 5.5.3 Aufgaben des Positionierungsdienstes

Der Positionierungsdienst muss für seine Nutzer Hinweise und Empfehlungen zur Messung im Referenzstationsnetz geben, wie die Landesvermessung dies für die eigenen Arbeiten in Form der Arbeitsrichtlinien SAPOS herausgibt. Dabei sind aktuelle Informationen über Systemstörungen und beispielsweise die Entwicklung der Ionosphäre wichtig. Kunden, die nicht mit der Echtzeitpositionierung vertraut sind, bedürfen der Beratung und Schulung.

Solange das Bezugssystem der Referenzstationen nicht mit dem amtlichen Bezugssystem identisch ist, sind Lösungen für die Koordinatentransformation bereitzustellen. Dabei können auch Zusatzdienste angeboten werden, z.B. die Lieferung der zur Visualisierung der Messungen notwendigen digitalen Kartengrundlagen.

Zu den wichtigsten internen Aufgaben des Positionierungsdienstes gehört das gesamte Datenmanagement, von der laufenden Qualitätssicherung bis zur dauerhaften Datenarchivierung. In diesem Zusammenhang sind noch zahlreiche Fragen der technischen Realisierung, der zur Archivierung geeigneten Datenformate, der speicherbaren Datenmengen, der Kosten und der Metadaten-Dokumentation zum Wiederauffinden bestimmter Beobachtungen ungeklärt. Der Bedarf für zukünftige Langzeituntersuchungen auch des aktiven Raumbezugssystems besteht, wie die Projekte zur Untersuchung der niedersächsischen Höhenetze für den Küstenschutz zeigen.

## 5.6 Beispiele operationeller Positionierungsdienste

### 5.6.1 Gliederung verfügbarer Referenzstationsnetze

Die Zahl der permanent installierten, aktiven Referenzstationen nimmt weltweit zu. Im einfachsten Fall werden die gesammelten Beobachtungen vom Betreiber per Datenträger oder Modemverbindung abgerufen und nur für eigene Zwecke verwendet. Ein Positionierungsdienst stellt dagegen die Daten der Referenzstationen der Allgemeinheit zur Verfügung, entweder per Internet oder einem anderen Kommunikationsmedium. Die Dienste lassen sich danach unterscheiden, ob die Daten für Postprocessing- oder für Echtzeitanwendungen verwendet werden. Während die Postprocessingdaten im RINEX-Standard alle Beobachtungen der Referenzstationen enthalten, sind Echtzeitanwendungen danach einzuteilen, ob sie nur Codekorrekturen oder auch Trägerphasenkorrekturen ausstrahlen. Viele Dienste sind inzwischen multifunktional aufgebaut und können die Referenzstationsbeobachtungen in unterschiedlichen Formen und Formaten über verschiedene Kommunikationslösungen nach dem Bedarf der Nutzer anbieten.

Eine klassische Einteilung der Referenznetzdienste orientiert sich an der mit der Netzausdehnung verbundenen Hierarchieebene der Netze. Nach den globalen Diensten folgen kontinentale (Hierarchie A) Dienste, nationale (B) Dienste und regionale (C) bzw. lokale (D) Dienste. Die Dienste bedienen sich dabei aber Referenzstationen, die Daten für verschiedene Netze liefern. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit

seien nachfolgende Referenznetze und -dienste genannt. Details der Dienste können auf der jeweiligen Homepage nachgelesen werden.

Der International GPS Service (IGS) und das Internet-based Global Differential GPS System (IGDG) des JPL zählen zu den globalen Diensten, zu denen auch die kommerziellen Anbieter Satloc (Withead et al. 1998) und StarFire (Hatch et al. 2001) gehören, die auf das Netz und die Software des JPL zurückgreifen. Weitere globale kommerzielle Dienste im WADGPS-Bereich sind SkyFix und OmniSTAR. Kontinentale Dienste stellen das EUREF Permanent Network (EPN) dar oder das Sistema de Referencia por GPS en America del Sur (SIRGAS) in Südamerika.

Auf nationaler und regionaler Ebene gibt es eine Vielzahl an Referenzdiensten für unterschiedliche Anwendungen. Für Deutschland sind das nationale GREF des BKG und die SAPOS-Netze der Landesvermessungen zu nennen, deren Konzept als EUPOS auch auf osteuropäische Staaten übertragen wird. Die USA und Kanada verfügen mit dem Continuously Operating Reference Station (CORS)-Netz des U.S. NGS und dem Canadian Base Network (CNB) der Landesvermessung Geomatics Canada zum einen über umfangreiche Referenzstationsnetze und zum anderen noch zusätzlich über DGPS-Systeme der jeweiligen Coast Guard zur Navigation in den Wasserstraßen und küstennahen Gewässern. In Brasilien betreibt das Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) mit dem Continuous Brazilian Monitoring Network (RBMC) ein sehr weitmaschiges Netz, während GEONET in Japan aus einem äußerst dichten Netz für die Erdbebenvorhersage besteht.

Die wissenschaftlich organisierten Dienste wie der IGS, aber auch behördliche Dienste wie SAPOS, befassen sich mit der Realisierung und Überwachung der Raumbezugssysteme und leiten grundlegende Produkte (Präzise Ephemeriden und Satellitenuhren, Erdorientierungsparameter (EOP)) aus den Beobachtungen ab. Die globalen Dienste werden zunehmend für die Bahnbestimmung von LEOs eingesetzt. Ein großer Teil der regionalen Netze dient geodynamischen Monitoringaufgaben. Im Mittelpunkt der kommerziellen Dienste steht die Positionierung und Navigation in der Landwirtschaft, der Seeschifffahrt und im Landverkehr.

### 5.6.2 Satellitenpositionierungsdienste für Vermessungsaufgaben

Mit der Realisierung eines aktiven Raumbezugssystems durch die über 250 SAPOS-Stationen in Deutschland hat die von Vaníček et al. (1983) angedeutete Zukunft der festpunktlosen Festpunktfelder begonnen. Insbesondere aufgrund von Wirtschaftlichkeitsberechnungen, wie Augath (1994) am Beispiel der AP-Netze zeigt, wird das früher terrestrisch gemessene Lagefestpunktfeld und auch zunehmend das Höhenfestpunktfeld durch die dreidimensionale differentielle GPS-Positionierung ersetzt. Die aktiven Referenzstationsnetze haben die Aufgaben und Arbeitsweise der Grundlagenvermessung grundlegend gewandelt.

Im Vergleich zu den vielen Jahrzehnten, die für den Aufbau und die Verdichtung des Trigonometrischen Festpunktfeldes benötigt wurden, hat sich der SAPOS-Dienst in nur einer Dekade weiter entwickelt, als es jemals geplant war. Nachdem der GPS-Einsatz in der niedersächsischen Landesvermessung 1983 begann, wurde von 1992 bis 1996 im Rahmen des Projektes HPPS I (Hochpräziser Permanenter Positionierungs-Service) ein Konzept für permanente Referenzstationen entwickelt. Aus der Zeit stammen wichtige Festlegungen wie die auf Untersuchungen von Fröhlich (1995) beruhenden Referenzstationsabstände und die geforderte Multifunktionalität. Im Folgeprojekt HPPS II (Jahn 1996), das von 1996 bis 1998 dauerte, wurde die Echtzeitkorrekturdatenübertragung im 2-m-Funk getestet, nachdem sich die ab 1993 verfügbaren RTK-Systeme als leistungsfähig für den Einsatz in der Landes- und Liegenschaftsvermessung erwiesen haben (Draken 1996).

Die flächendeckende Einrichtung der 41 Referenzstationen (Abb. 5.11) erfolgte zwischen 1998 und 2002. Zwischenzeitlich wurde mit der Kalibrierung der Referenzstationsantennen begonnen und nach einem

Vergleichstest des FKP- und des VRS-Verfahrens (Jahn et al. 2001) die Vernetzung aller Referenzstationen nach dem FKP-Modell aufgebaut. Mit der späteren Einführung der Korrekturdatenübertragung per Mobilfunk werden auch VRS-Daten bereitgestellt.

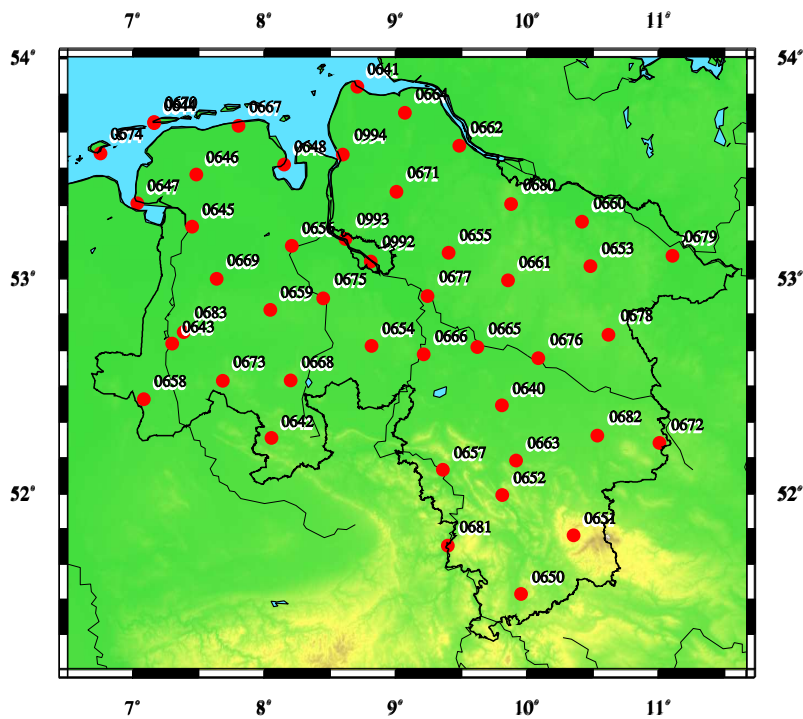


Abbildung 5.11: Niedersächsisches SAPOS-Referenzstationsnetz 2004

Wenn sich die Bundesländer auch mit sehr unterschiedlicher Intensität an dem Aufbau eines nationalen DGPS-Dienstes (Hankemeier 1995) engagiert haben, ist die Einrichtung eines deutschlandweiten Satellitenpositionierungsservices (SAPOS) dennoch gelungen. Auf die Beschreibung des Konzeptes, der Dienste und der Anwendungen des SAPOS wird verzichtet, da sie in zahlreichen Veröffentlichungen behandelt werden. Dazu zählen die Berichte der Expertengruppe GPS-Referenzstationen im AdV-Arbeitskreis Raumbezug (AdV 1998, 2002, 2004), die Publikationen der Zentralen Stelle SAPOS (z.B. Draken 2005) und als sehr umfassende Informationsquelle die inzwischen fünf SAPOS-Symposien. In den Veröffentlichungen werden jedoch nur sehr spärliche Informationen über die Grundlagen der Referenzstationsnetze und der präzisen Echtzeitpositionierung gegeben, deren Zusammenstellung deshalb wesentlicher Bestandteil der Grundlagenkapitel sind.

Auch in anderen Staaten haben die Landesvermessungsbehörden ähnliche Positionierungsdienste eingerichtet, wie beispielsweise in Belgien (FLEPOS, WALCORS), Großbritannien, Irland (IRENET), Niederlanden (AGRS.NL), Norwegen (SATREF), Schweden (SWEPOS) oder der Schweiz (SWIPOS). Neben den staatlichen Behörden engagieren sich auch Privatunternehmen, hauptsächlich aus dem Bereich der Energieversorgung und Telekommunikation in dem Markt für ortsbezogene Dienste (LBS) und bauen eigene Positionierungsdienste auf. Ein Beispiel dafür in Deutschland ist das ascos-Referenzsystem der EON Ruhrgas AG, in Österreich die ebenfalls von Energieversorgungsunternehmen eingerichteten Netze im Burgenland (SATVB), in Kärnten sowie in Wien.



## 6 Untersuchungen in PDGPS-Referenzstationsnetzen

### 6.1 Einleitung

Für die Untersuchungen zur Echtzeitvernetzung standen zunächst nur die vier Referenzstationen Hannover, Braunschweig, Clausthal-Zellerfeld und Alfeld der von der LGN testweise aufgebauten südniedersächsischen Referenzstationsmasche zur Verfügung. Im Hamburger SAPOS-Referenznetz mit ebenfalls vier Stationen ergab sich eine weitere Möglichkeit für Testmessungen.

Zuerst musste eine effektive Untersuchungsmethodik entwickelt werden, die statistisch gesicherte Aussagen über die Genauigkeit, Zuverlässigkeit und sowohl zeitliche als auch flächendeckende Verfügbarkeit der Vernetzung erlaubt (Kap. 6.2). Beobachtungen im Feld spiegeln nur eine Momentaufnahme des Referenzstationsbetriebes wieder, der gerade in der Aufbauphase noch vielen Veränderungen bezüglich der eingesetzten Hard- und Software unterlag. Zudem beeinflussen die variablen Umweltbedingungen die Ergebnisse, wie insbesondere an den mit dem Sonnenzyklus 23 ansteigenden ionosphärischen Störungen erkennbar ist. Der periodische Verlauf der elfjährigen Sonnenzyklen ist in Abb. 6.1 anhand der Anzahl der Sonnenflecken gut zu erkennen. Abbildung 6.2 zeigt den Anstieg des Mean TEC für den gegenwärtigen Sonnenzyklus 23 mit dem grau hinterlegten Untersuchungszeitraum.

Zur Abschätzung und Modellierung der Fehlereinflüsse in einer Echtzeit-Multistationslösung ist es notwendig, nicht nur die Wirkung der Vernetzung durch Messungen innerhalb des Referenzstationsnetzes zu beobachten, sondern diese bereits auf der Ebene der Multistationslösung zu untersuchen. Dies ist allerdings kaum möglich, ohne die laufende Referenzstationsvernetzung zu stören, selbst wenn sie sich im Testbetrieb befindet. Deshalb musste mit der Echtzeitsimulation (Kap. 6.3) erst ein Verfahren entwickelt werden, das es ermöglicht, die Referenzstations- und Roverdaten mit unterschiedlichen Parametern zu prozessieren.

Im Hinblick auf die Referenzstationsvernetzung werden die verschiedenen GPS-Fehlereinflüsse in entfernungs- und stationsabhängige Fehler eingeteilt (Tab. 6.1). Die entfernungsabhängigen Fehler lassen sich nur durch eine Multistationslösung kompensieren, während die stationsabhängigen Fehler durch das Mittel von Beobachtungsreihen und durch Kalibrierung eliminiert werden. Die Antennenkalibrierung und Referenzstationskalibrierung zur Schätzung der Mehrwegeausbreitung ist bereits Gegenstand der Dissertationen von Böder (2002) und Menge (2003) und der laufenden Untersuchungen von Dilßner et al. (2004).

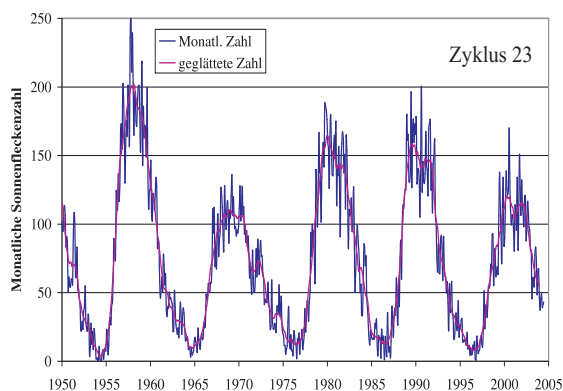


Abbildung 6.1: Anzahl der Sonnenflecken in den letzten vier Sonnenzyklen (SIDC 2005)

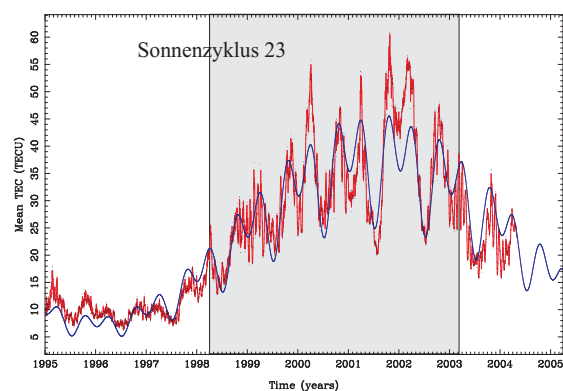


Abbildung 6.2: Zeitreihe des Mean TEC seit dem 1. Januar 1995 (CODE 2005)

Damit beschränken sich die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit im wesentlichen auf die entfernungsabhängigen Fehler. Auf die Diskussion der funktionalen Fehlermodelle wird dabei verzichtet, da sie bereits in zahlreichen Veröffentlichungen ausführlich behandelt werden. Das Fehlerverhalten in lokalen und regionalen Netzen ist auf der Grundlage anderer Forschungsarbeiten im wesentlichen bekannt. Für detaillierte Grundlagen sei auf Teunissen, Kleusberg (1998) verwiesen, in bezug auf die Parameterschätzung mit undifferenzierten Beobachtungen auf Wübbena (1991) und Völksen (2000). Die von Wanninger (2000) für das VRS-Verfahren erarbeiteten Ergebnisse zur Linearität der entfernungsabhängigen Fehler gelten auch für das FKP-Verfahren.

Tabelle 6.1: Entfernungs- und stationsabhängige Fehlereinflüsse und deren Kompensation

Entfernungsabhängige Fehler	Stationsabhängige Fehler
Bahnfehler	Empfängerrauschen
Regionale ionosphärische Laufzeitverzögerung	Mehrwegeausbreitung
Troposphärische Laufzeitverzögerung	Antennenphasenzentrum
⇒ Multistationslösung	⇒ Mittelbildung, Kalibrierung

Auf der Grundlage der Untersuchungen in Norddeutschland (Kap. 6.4) wurde die Methodik und Technologie der Referenzstationsvernetzung nach Brasilien übertragen und an die dortigen, durch die Nähe zum geomagnetischen Äquator bedingten, extremen ionosphärischen Fehlereinflüsse angepasst. Die in Kooperation mit der Universidade Federal do Paraná (UFPR) in Curitiba und der Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) in Recife durchgeführten Projekte sind in Kap. 6.5 beschrieben.

Ein wichtiger Anwendungsbereich von Referenzstationsdiensten sind die Landes- und Liegenschaftsvermessung, die hohe Anforderungen an die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Echtzeitpositionierung stellen. Kapitel 6.6 gibt aktuelle Ergebnisse aus dem inzwischen vollständig ausgebauten und seit 2004 im operationellen Betrieb befindlichen niedersächsischen SAPOS-Netz wieder. Abschließend wird auf eine vom IfE entwickelte Lösung zur großräumigen Koordinatentransformation eingegangen, die notwendig ist, um die im Bezugssystem des Referenznetzes (ERTF 89) ermittelten Roverpositionen in das amtliche Bezugssystem LS 100 zu transformieren.

## 6.2 Untersuchungsansatz

Mit der Echtzeitvernetzung ändern sich die Voraussetzungen für GPS-Beobachtungen und kommen neue Untersuchungsziele hinzu. Zwar sind multi-session-Beobachtungen weiterhin notwendig, d.h. Roverpunkte sind mindestens zweimal unabhängig voneinander zu beobachten. Die Multistationslösung wird dagegen bereits vom Referenzdienst mit den Netzkorrekturparametern ausgestrahlt und muss nicht vom Nutzer berechnet werden, dem damit statistische Informationen über die Qualität der Netzlösung fehlen. Zum Wesen der Echtzeitpositionierung gehört, dass im Prinzip nur eine Koordinatenlösung, eventuell mit einer Standardabweichung, erzeugt wird. Für weitergehende Analysen fehlen dem Nutzer die Beobachtungen der in die Vernetzung einbezogenen Referenzstationen.

Zugleich muss die Untersuchung der Referenzstationsvernetzung um zusätzliche Aspekte ergänzt werden, die aus den Forderungen nach flächendeckender Verfügbarkeit und permanenter Betriebsbereitschaft resultieren. Hierbei ist zwischen der Verfügbarkeit und Integrität der GPS-Korrekturdaten mit den Vernetzungsparametern einerseits und der Verfügbarkeit der gesamten Infrastruktur eines Referenzstationsdienstes einschließlich des Korrekturdatenempfangs im Feld andererseits zu unterscheiden.



Die Validierung des Systems Referenzstationsdienst mit allen Teilaspekten erfordert daher die Entwicklung neuer Untersuchungsstrategien. Dabei hat es folgende, durch Softwareentwicklungen und den Ausbau der Infrastruktur bedingte Entwicklungsschritte gegeben. Durch Beobachtungen auf ausgewählten Referenzpunkten (TP) innerhalb einer RS-Masche kann zusätzlich zur Dauer der Mehrdeutigkeitslösung (TTFA) die äußere Genauigkeit der Echtzeit-Multistationslösungen beurteilt werden. Weiterhin lässt sich die räumliche Verfügbarkeit des Korrekturdatensignals bestimmen. Die wiederholte Beobachtung vieler TP ist jedoch sehr arbeits- und zeitaufwendig. Netzspannungen sowie das Punktrauschen der TP beeinträchtigen die Untersuchungsergebnisse, die immer nur für ein kurzes Zeitfenster von wenigen Stunden je TP gelten.

Die Konzentration auf Profilmessungen in Nord/Süd- und Ost/West-Richtung ermöglicht, mit weniger beobachteten Punkten die Referenzstationsmasche systematisch abzudecken. Unter der Annahme, die systematischen GPS-Fehler wirken sich entlang der beiden Koordinatenachsen maximal aus, kann das Vernetzungsmodell besser getestet werden. Erweitert man die Profile über den Rand einer Referenzstationsmasche hinaus, lässt sich zugleich das Extrapolationsverhalten untersuchen. In der Praxis ist es jedoch schwierig, für solche Profilmessungen geeignete Roverpunkte zu finden. Zudem bleibt das Problem, dass die zeitlich begrenzten Feldbeobachtungen nicht unbedingt zu repräsentativen Ergebnissen führen.

Zur Validierung des Referenzstationsbetriebes hat es sich gegenüber punktuellen Feldbeobachtungen als sinnvoller erwiesen, permanente Beobachtungen auf einzelnen ausgewählten Punkten wie beispielsweise dem Messdach der Universität Hannover durchzuführen. Der nächste konsequente Schritt ist, Referenzstationen selbst für ein permanentes Monitoring einzusetzen, z.B. die Referenzstation Hildesheim innerhalb der südniedersächsischen Referenzstationsmasche. Die Beobachtungen der Monitorstation lassen sich kontinuierlich in einem automatisierten Prozess analysieren und damit die Verfügbarkeit sowohl der Korrekturdaten mit den Vernetzungsparametern als auch der gesamten Infrastruktur überwachen. Ein operationeller Referenzdienst darf sich dabei nicht auf das Monitoring beschränken, sondern muss bei Fehlfunktionen entsprechende Alarmer auslösen, die den Referenzdienstbetreiber und die Nutzer zeitnah warnen.

Die bislang aufgeführten Untersuchungsstrategien beruhen auf Beobachtungen im Echtzeitbetrieb durch Aufzeichnung der Koordinatenlösungen, TTFA-Werte und weiterer Positionierungsparameter wie z.B. DOP-Werten. Detailliertere Fehlerbetrachtungen sind nur für den Betreiber auf der Grundlage der Referenzstationsbeobachtungen im Postprocessing möglich. Experimentelle Untersuchungen im laufenden Referenznetzbetrieb dürfen die Nutzer nicht beeinträchtigen und sind deshalb schwierig.

Für das Postprocessing der Echtzeitbeobachtungen gibt es konkret zwei Möglichkeiten, entweder mit der Postprocessingsoftware GEONAP oder mit der Echtzeit-Multistationssoftware GNNET. GEONAP ist für das reine Postprocessing die effektivere Lösung, da es auf einer sequentiellen Parameterschätzung basierend bei der Auswertung schneller ist. Da die GPS-Beobachtungen gesammelt werden und die Inversion nicht zu jeder Epoche erfolgt, stehen die Zustandsparameter erst nach der Inversion der Normalgleichungsmatrix zur Verfügung. Damit lässt sich der Prozess der Echtzeitauswertung nicht exakt abbilden.

Die Echtzeitsoftware GNNET basiert dagegen auf einem Kalman-Filter, der die Normalgleichungen zu jeder Beobachtungsepoche invertiert. Damit stehen alle Zustandsparameter zu jeder Epoche für Analysen zur Verfügung, wodurch die Auswertung jedoch langsamer und rechenintensiver ist als eine GEONAP-Auswertung. Dafür entspricht das Postprocessing mit GNNET der realen Echtzeitvernetzung, weshalb es als Echtzeitsimulation bezeichnet wird. Die Details der Simulation mit den verbleibenden Unterschieden gegenüber realen Lösungen werden im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

### 6.3 Echtzeitsimulation

Im laufenden Betrieb eines Referenzstationsnetzes werden RTCM-Korrekturdaten ausgestrahlt, ohne diese Datenströme zugleich aufzuzeichnen. Stattdessen werden normalerweise die Empfängerrohdaten in das RINEX-Format konvertiert und für Postprocessing-Anwendungen archiviert. Für den Sonderfall einer Echtzeitsimulation benötigt man die gespeicherten RTCM- oder RINEX-Dateien der Referenzstationen sowie die Beobachtungen der zu positionierenden Rover. Soweit der Rover nicht gleichzeitig eine Referenz- oder Monitorstation ist, sind für diesen Rover nur RINEX-Daten verfügbar.

Die Echtzeitsimulation, das nachträgliche Prozessieren der Echtzeitdaten, basiert auf der Verarbeitung von RTCM-Nachrichten und erfordert deshalb als erstes die Konvertierung aller RINEX-Beobachtungen in das RTCM-Format. Mit diesen RTCM-Dateien und denselben Softwaremodulen, die auch im Referenzstationsnetz laufen, werden die Berechnungen wiederholt, wobei nun die Möglichkeit besteht, die Auswerteparameter zu variieren.

Zur RINEX-RTCM-Wandlung müssen alle auch im Echtzeitbetrieb notwendigen Informationen vorliegen. Dazu gehören die mit einer Datenrate von mindestens 1 Hz aufgezeichneten RINEX-Beobachtungen, die präzisen Referenzstationskoordinaten, Antennenhöhen und die Kalibrierwerte aller Antennen sowie ein Satz Broadcast Ephemeriden, der für alle Stationen verwendet wird. Die in Dateiform vorliegenden Daten werden vom Modul GNRT aus dem im niedersächsischen Referenzstationsnetz eingesetzten Softwarepaket GNSMART der Firma Geo++ eingelesen, das daraus die Differentialkorrekturen der Referenzstationen berechnet (Abb. 6.3). Das Modul RTCM\_OUT übernimmt die Korrekturwerte und schreibt diese im RTCM-Format für jeweils eine volle Stunde in binäre Dateien, im folgenden mit \*.rcm bezeichnet.

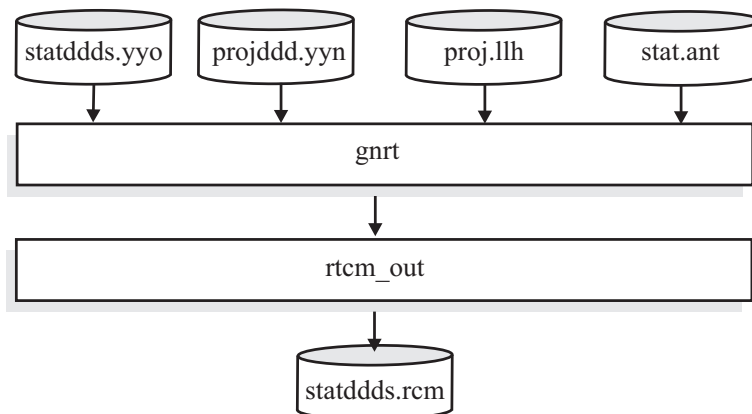


Abbildung 6.3: Konvertierung von RINEX-Beobachtungen in RTCM-Korrekturdaten

Die Berechnung der Vernetzungsparameter in einer Echtzeit-Multistationslösung ist Aufgabe von GNNET. Dieses Programmmodul liest mit Hilfe der RTCM\_IN-Prozesse die Korrekturdaten aus den binären rcm-Dateien ein. In der richtigen zeitlichen Synchronisation der RTCM-Datenströme, die durch ein zusätzliches Modul GNRIM gesteuert werden, besteht die größte Schwierigkeit der Echtzeitsimulation.

In GNNET erfolgt die Mehrdeutigkeitslösung zwischen den Referenzstationen und die Schätzung der entfernungsabhängigen Fehler. Die Flächenkorrekturparameter (FKP) in Form von vier Netzkoeffizienten ( $aNi, aEi, aNo, aEo$ ) werden berechnet und stehen für die Simulation in internen Datenstrukturen bereit. Darauf setzt ein zweiter GNNET-Prozess auf, der zum einen die Korrekturdaten und Vernetzungsparameter aus der internen Datenstruktur liest und zum anderen auf die Beobachtungen des Rovers zugreift. Der zweite GNNET-Prozess berechnet PDGPS-Lösungen für den Rover und gibt diese mit dem

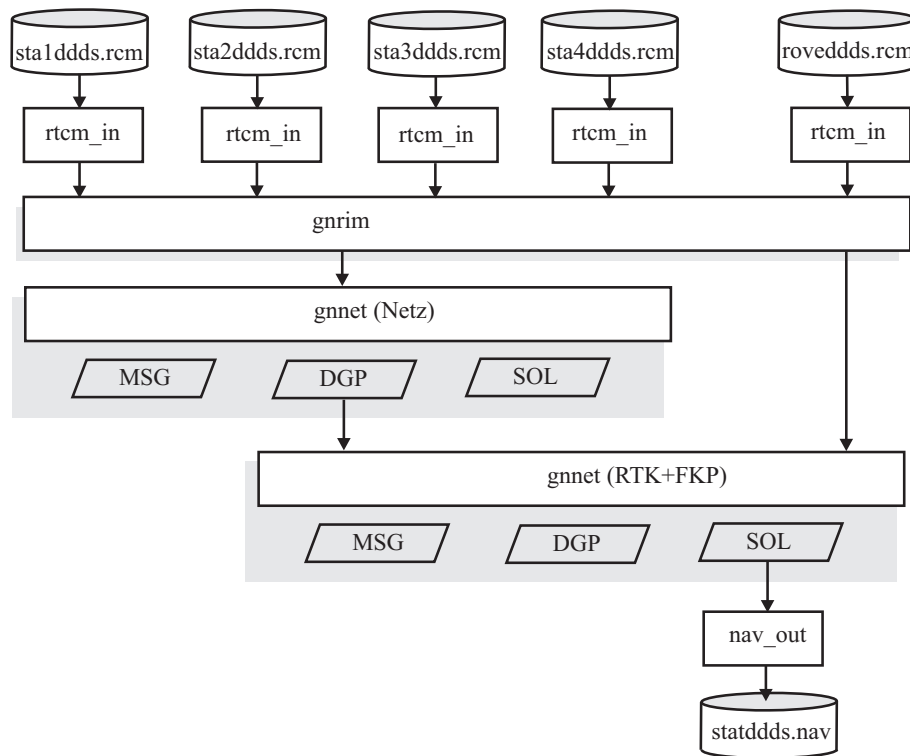


Abbildung 6.4: Simulierte Echtzeit-Referenzstationsvernetzung und Rover-Positionierung

Modul NAV\_OUT im NMEA-Format aus (Abb. 6.4). Die PDGPS-Lösungen können für vergleichende Analysen wahlweise mit und ohne Vernetzungsparameter berechnet werden.

Die bislang übliche Vorgehensweise, auf Referenzstationen sowohl RTCM-Korrekturdaten auszusenden als auch RINEX-Dateien zu speichern, ist angesichts der Konvertierbarkeit der beiden Formate in Frage zu stellen. Denn aus den kompakten binären RTCM-Dateien können umgekehrt auch wieder ASCII-lesbare RINEX-Dateien gewonnen werden (Bagge 2001). Der Wandlung müssen genau die gleichen Ephemeriden zugrunde liegen, die auch bei der Berechnung der RTCM-Korrekturen verwendet wurden, um exakt die gleichen Satellitenpositionen berechnen zu können. Aus den Satellitenpositionen und den Referenzstationskoordinaten werden die topozentrischen Koordinaten (geometrische Entfernung  $r$ , Azimut  $\alpha$ , Elevationswinkel  $\varepsilon$ ) abgeleitet. Wird die Pseudostreckenkorrektur zu der geometrischen Entfernung addiert und alle weiteren Korrekturen, die bei der RTCM-Berechnung angebracht wurden, berücksichtigt, erhält man die rekonstruierten Beobachtungen, die im RINEX-Format gespeichert werden können.

Zu den zu berücksichtigenden Korrekturen gehören u.a. der Satellitenuhrfehler, die relativistische Korrektur, die Erdrotationskorrektur und die Phasenzentrumsexzentrizitäten aus der Antennenkalibrierung. Nicht rekonstruieren lässt sich der auf einer Station für alle beobachteten Satelliten identische Empfängeruhrfehler, wodurch sich die Zahlenwerte der rekonstruierten RINEX-Datei von einer originär aufgezeichneten RINEX-Datei unterscheiden. Das für alle Satelliten gleiche Niveau des Empfängeruhrfehlers hat jedoch keine Auswirkung auf die Koordinatenschätzung.

Bei der RTCM-RINEX-Wandlung ergibt sich ein Synchronisationsproblem durch den Zeitbezug in den RTCM-Nachrichten. Der mit dem Nachrichtentyp 14 abgestrahlte modified Z-count liefert mit einer Auflösung von 0,6 s nur die Zeit innerhalb einer Stunde, aber keine Angabe, um welche Stunde oder welchen Tag innerhalb einer GPS-Woche es sich handelt. Zur richtigen Zeitsynchronisation muss die Stunde der Woche aus dem Time of Week (TOW) Count der GPS-Navigationsnachricht abgeleitet werden.

## 6.4 Untersuchungen in Norddeutschland

### 6.4.1 Südniedersächsische Referenzstationsmasche

Zu Beginn der Untersuchungen in der südniedersächsische Referenzstationsmasche musste die räumliche und zeitliche Verfügbarkeit der Vernetzungslösungen bestimmt werden. Dazu wurden im Frühjahr und Sommer 1998, 1999 und 2000 eine Reihe von in Abb. 6.5 dargestellten Trigonometrischen Punkten (TP) des niedersächsischen Landesbezugssystems mehrfach besetzt. In Bezug auf den Korrekturdatensender in Hannover, der auf einem Hochhaus (MZG) der Universität Hannover installiert ist, wurden Reichweiten von bis zu 40 km, u.a. bis Lengede, erzielt. Deutlich kürzere Reichweiten weisen die Sender der Referenzstationen Braunschweig (BS), Alfeld (ALF) und Clausthal-Zellerfeld (CLZ) auf, die lediglich über Entfernungen von 15 bis maximal 30 km zu empfangen waren. In der Aufbauphase war der Funkempfang nicht kontinuierlich gewährleistet. Ein Zusammenhang mit der Tageszeit oder meteorologischen Bedingungen konnte nicht hergestellt werden.

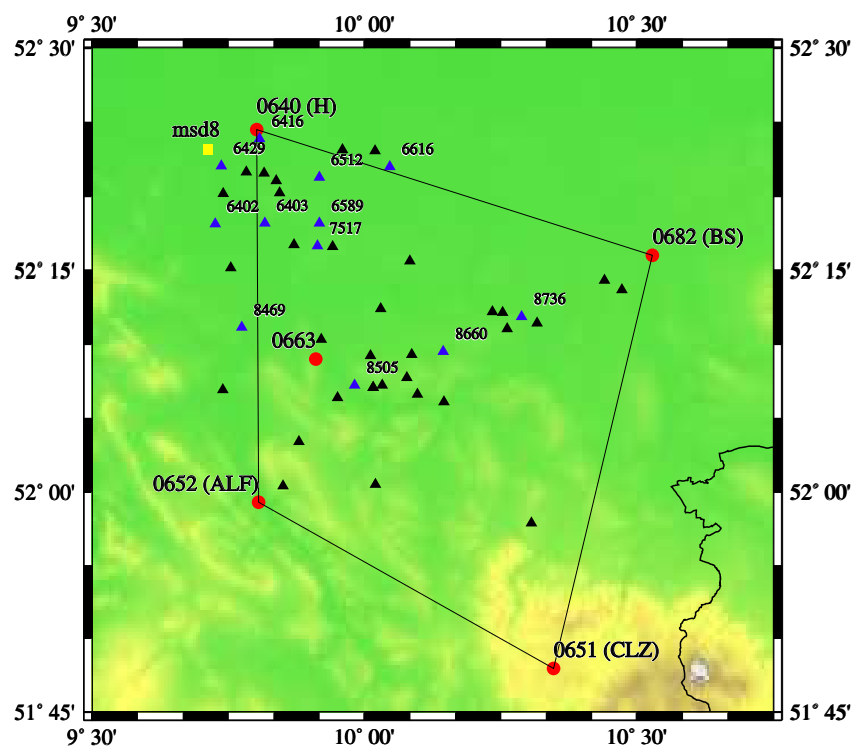


Abbildung 6.5: Untersuchungsgebiet südniedersächsische Referenzstationsmasche

Der Korrekturdatenempfang im 2-m-Band wies dagegen eine deutliche Abhängigkeit von den verwendeten Funkempfängern und -antennen auf. Selbst baugleiche Geräte zeigten signifikante Unterschiede im Korrekturdatenempfang. Wie Abb. 6.6 am Beispiel des TP Ilten (6512) belegt, hat das IfE-Funkmodem einen stabileren Funkempfang und ermöglicht damit mehr Lösungen in einem Zeitintervall als das baugleiche Modem der LGN.

Auf einigen TP ist der Korrekturdatenempfang sowohl von der Referenzstation Hannover als auch von den Stationen Alfeld beziehungsweise Braunschweig möglich. Ein Vergleich der Lösungen bezogen auf

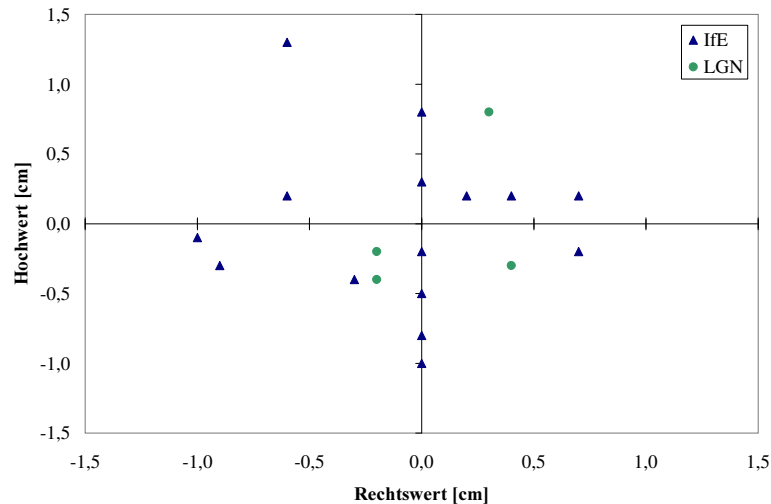


Abbildung 6.6: Anzahl und Verteilung der Echtzeitlösungen auf dem TP Ilten mit zwei baugleichen Funkempfängern des IfE und der LGN

die verschiedenen Referenzstationen ergibt Differenzen von 1 bis 8 cm, die hauptsächlich auf den entfernungsabhängigen Fehlern beruhen. Eine Gegenüberstellung der RTK-Lösungen bezogen auf die Referenzstation Hannover und die Netzlösungen zeigt Abb. 6.7. Darin sind die Lagerresiduen mit ihren Standardabweichungen als Funktion des Referenzstationsabstandes jeweils für die RTK- und die Netzlösungen dargestellt. Der lineare Trend der RTK-Lösungen beträgt mit 1,7 ppm das vierfache des linearen Trends der Netzlösungen, die mit 0,4 ppm eine geringe aber signifikante Entfernungsabhängigkeit aufweisen.

Die Lagerresiduen enthalten Restfehler aus der Koordinatentransformation der im amtlichen Bezugssystem LS 100 gegebenen TP-Koordinaten sowie Abweichungen, die aus den Beobachtungen auf dem TP-Pfeiler anstatt über der Platte resultieren. Da die TP nacheinander für jeweils 1–2 Stunden beobachtet wurden, beziehen sich die Ergebnisse auf unterschiedliche Satellitengeometrien und atmosphärische Einflüsse.

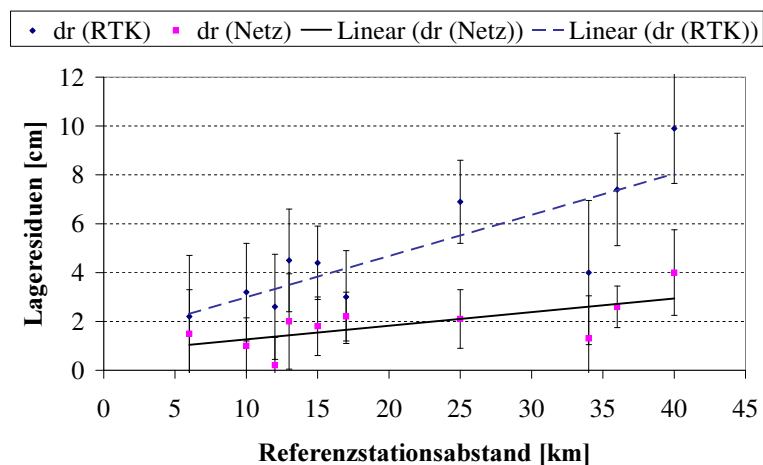


Abbildung 6.7: Entfernungsabhängigkeit der Lagerresiduen für ausgewählte TP in der südniedersächsischen Referenzstationsmaschine

Für die Untersuchungsergebnisse müssen Randbedingungen vorgegeben werden. In die Analyse werden nur Lage- und Höhenabweichungen von einem Soll- oder Mittelwert bis maximal 10 cm und TTFA-

Werte bis maximal 15 Minuten einbezogen. Alle darüber hinausgehenden Lösungen werden als grobe Fehler verworfen. Die maximale TTFA-Zeit folgt aus der in der Praxis tolerierbaren Beobachtungszeit selbst bei langen Basislinien. Über 15 Minuten hinausgehende TTFA-Werte stellen keinen Vorteil mehr gegenüber konventionellen schnellen statischen Beobachtungen mit Postprocessing-Auswertung dar.

In der vorgenannten Untersuchung beträgt die Ausreißerquote bis zu 20% auf einzelnen Punkten, die dabei auftretenden Lagefehler betragen bis zu 16 m. Die TTFA-Werte für RTK- und Netz-Lösungen sind bis zu einem Referenzstationsabstand von 20 km mit rund 2 Minuten praktisch gleich. Über größere Entfernungen (25–40 km) steigen die TTFA-Werte der erfolgreichen Lösungen auf 5–10 Minuten, wiederum gleich für RTK- und Netz-Lösungen, wobei allerdings rund ein Drittel weniger RTK-Lösungen erfolgreich sind. Daneben führten etwa ein Viertel aller Lösungsversuche durch einen unstabilen Korrekturdatenempfang über die größeren Entfernungen selbst bei Beobachtungszeiten von 30–60 Minuten zu keinem Ergebnis.

#### 6.4.2 SAPOS-Referenzstationsnetz Hamburg

In Zusammenarbeit mit dem Amt für Geoinformation Hamburg wurde der Einfluss der Entfernungsabhängigkeit der GPS-Echtzeitpositionierung am 16. und 17. März 1999 experimentell untersucht. Innerhalb des aus vier Referenzstationen bestehenden GPS-Referenznetzes wurden ausgewählte Punkte für jeweils mindestens zwei Stunden doppelt besetzt. Die Abstände zur zentralen Referenzstation Wexstraße betragen 10 km (RANG: Rangierbahnhof Billwerder), 16 km (STEW: Stemwarde) und 24 km (KIEB: Kiebisbrack). Der untersuchte Entfernungsbereich ist, bedingt durch die Ausdehnung des Hamburger Stadtgebietes, beschränkt. Die benachbarten niedersächsischen Referenzstationen wurden zu dem Untersuchungszeitpunkt noch nicht in die noch experimentell arbeitende Hamburger Vernetzung einbezogen.

Trotz des geringen Stichprobenumfangs in dem kleineren Untersuchungsgebiet werden die Ergebnisse der südniedersächsischen Messungen und die theoretischen Annahmen bestätigt. Wie Abb. 6.8 zeigt, steigen die Residuen der RTK-Lösungen mit der Entfernung an. Sie sind mit 5 ppm in der Lage bzw. 9 ppm in der Höhenkomponente unerwartet groß, lassen sich jedoch durch die jahreszeitlich bedingt angestiegenen ionosphärischen Laufzeitfehler erklären. Die Residuen der Netzlösungen sind mit weniger als 0,1 ppm praktisch entfernungsunabhängig. Mit ca. 1 cm (Lage) bzw. 2 cm (Höhe) erfüllen sie die Anforderungen für Liegenschaftsvermessungen.

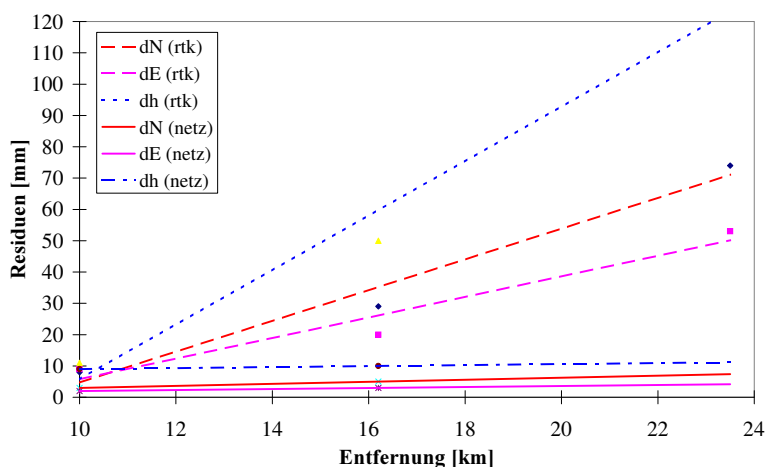


Abbildung 6.8: Residuen von RTK- und Netzlösungen für DOY 076 in Abhängigkeit der Referenzstationsentfernung der Stationen RANG (10 km), STEW (16 km) und KIEB (24 km)

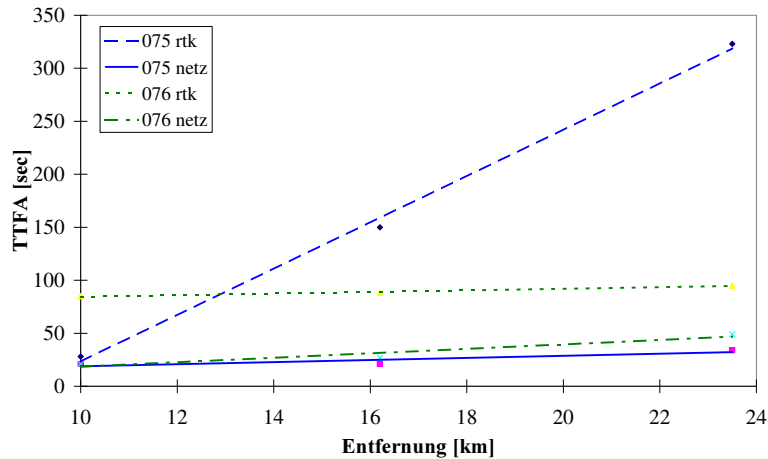


Abbildung 6.9: Zeit zur Mehrdeutigkeitsfestsetzung (TTFA) bei RTK- und Netzlösungen für DOY 075 und 076 in Abhängigkeit der Referenzstationsentfernung

Besonders hervorzuheben ist der aus den Untersuchungsergebnissen in Abb. 6.9 deutlich erkennbare wirtschaftliche Vorteil der Vernetzung. Echtzeitpositionslösungen mit den Korrekturdaten nur einer Referenzstation benötigen bei größeren Entfernungen deutlich länger. Zeitweise sind trotz guten Korrekturdatenempfangs über längere Zeitabschnitte von 30 Minuten und mehr keine Lösungen realisierbar. Mit Vernetzung hingegen ist die Schnelligkeit der Echtzeitleösungen nahezu entfernungsunabhängig, damit sind in einem Zeitabschnitt deutlich mehr Lösungen möglich als ohne Vernetzung.

In Abb. 6.9 sind die TTFA als Funktion der Entfernung für beide Messtage aufgetragen. Für den Tag 075 ist eine Entfernungsabhängigkeit der RTK-Lösungen und deren Kompensation bei den Netzlösungen deutlich erkennbar. Am darauffolgenden Tag ist die Entfernungsabhängigkeit dagegen weniger ausgeprägt, die RTK-Lösungen benötigen aber immerhin noch doppelt soviel Zeit zum Fixing wie die Netz-Lösungen.

Wenn durch Kompensation entfernungsabhängiger Fehler durch die Vernetzung Mehrdeutigkeitslösungen schneller erfolgen, sind in einem Zeitabschnitt von beispielweise einer Stunde mehr Positionslösungen möglich als bei RTK-Lösungen (Abb. 6.10). Hier führt die zunehmende Entfernung dazu, dass die Anzahl der Fixings insgesamt sinkt und letztlich gar keine Fixings mehr möglich sind. Mit Vernetzung bleibt die Anzahl der Fixings nahezu unabhängig von der Entfernung.

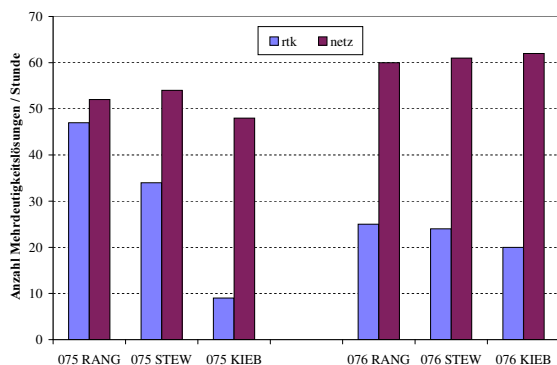


Abbildung 6.10: Anzahl aller Mehrdeutigkeitsfestsetzungen bezogen auf eine einstündige Beobachtungsdauer

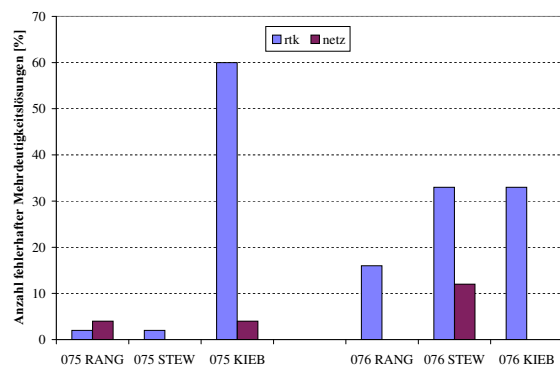


Abbildung 6.11: Anzahl aller grob fehlerhaften Mehrdeutigkeitsfestsetzungen bezogen auf die Gesamtzahl aller Fixings

Mit zunehmender Entfernung treten bei RTK-Lösungen mehr grob fehlerhafte Mehrdeutigkeitslösungen auf (Abb. 6.11). Bei den Netzlösungen bleibt die Häufigkeit der grob fehlerhaften Mehrdeutigkeitslösungen dagegen unabhängig von der Entfernung konstant unter 5%.

### 6.4.3 Ausgewählte Fehlerbetrachtungen

#### 6.4.3.1 Geometrische Fehleranteile

##### Satellitenbahnfehler

Der geometrische Anteil der entfernungsabhängigen Fehler setzt sich aus der Satellitengeometrie, den Satellitenbahnfehlern und Laufzeitfehlern in der Troposphäre zusammen. Während der troposphärische Fehleranteil aufgrund der hohen Korrelation mit der Stationshöhe und den Fehlern des Antennenphasenzentrums schwer zu bestimmen ist, lässt sich der Fehler der Broadcast Ephemeriden (B.E.) durch Vergleich mit präzisen Ephemeriden (P.E.) des IGS gut abschätzen.

Eine Gegenüberstellung der Bahnfehler im Jahr 1999 und im Jahr 2004 zeigt Abb. 6.12, dargestellt ist der Betrag des Bahnfehlervektors zwischen präzisen und Broadcast Ephemeriden. Die größten Abweichungen treten bei den GPS-Satelliten vom Typ Block II mit den PRN-Nummern 14–21 auf, die im Jahr 2004 teilweise bereits durch jüngere Block IIR-Satelliten abgelöst waren. Bei den PRN 23–29 macht sich im Jahr 2004 das gegenüber 1999 höhere Alter der zwischen 1990 und 1992 gestarteten Block IIA-Satelliten durch größere Fehler bemerkbar.

Im Mittel über alle Satelliten beträgt der Bahnfehler  $\delta\mathbf{o} = 4$  m sowohl für 1999 als auch im Jahr 2004. Durch die SA-Deaktivierung hat sich, da der  $\varepsilon$ -Prozess zur Verfälschung der Bahnen ohnehin nie aktiviert war, die Größenordnung der Bahnfehler nicht verringert. Allerdings hat sich die Standardabweichung der Bahnfehler von 2,5 m auf 1,5 m reduziert, was u.a. auf die Erneuerung des Raumsegmentes mit Block IIR-Satelliten mit neuen Uhren zurückzuführen ist. Betrug 1999 noch etwa 5% der B.E.-Bahnfehler bis zu 30 m, hat sich dieser Anteil bis 2004 auf unter 1% reduziert.

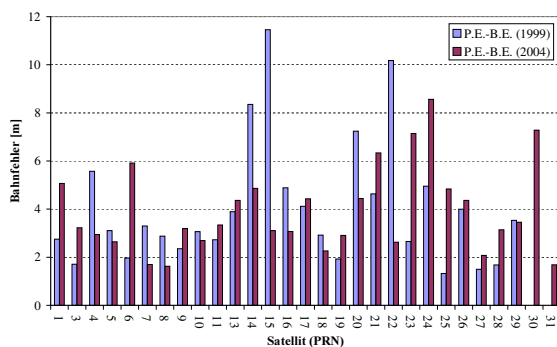


Abbildung 6.12: Betrag des Bahnfehlervektors im Vergleich von präzisen und Broadcast Ephemeriden von 1999 und 2004

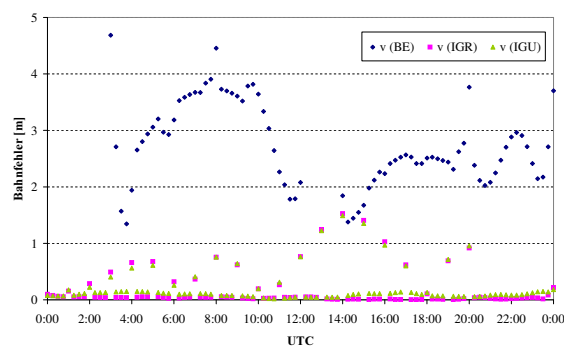


Abbildung 6.13: Betrag des Bahnfehlervektors von Broadcast Ephemeriden, Rapid (IGR) und der präzisierten Hälfte der Ultra-Rapid-Ephemeriden (IGU) gegenüber präzisen Ephemeriden

Am Beispiel des PRN 25 sind für den Tag 248 in 2004 die Abweichungen der Broadcast Ephemeriden gegenüber den P.E. in Abb. 6.13 aufgetragen. Ergänzend sind die Bahnfehler der IGS Rapid Orbits (IGR) und der präzisierten Hälfte der IGS Ultra Rapid Orbits (IGU) dargestellt. Die Abweichungen der IGR betragen im Mittel 16 cm mit maximalen Abweichungen von unter 2 m. Die präzisierte Hälfte der IGU weist bedingt durch die Extrapolation etwas größere Abweichungen auf, deren Mittelwert 30 cm



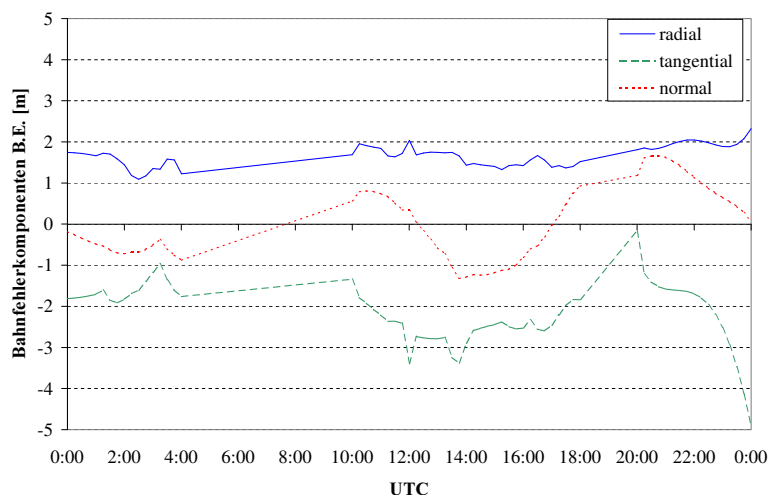


Abbildung 6.14: Radiale, tangentielle und normale Komponente des Bahnfehlervektors zwischen IGS P.E. und B.E. für PRN 19, GPS-Woche 1286-6

beträgt. Die maximalen Abweichungen bleiben ebenfalls unterhalb von 2 m, damit weisen die IGU in-zwischen ein höheres Genauigkeitsniveau auf als die B.E. und können in die Multireferenzstationslösung eingeführt werden.

Um die Auswirkung eines Bahnfehlers auf die Echtzeitlösung eines Rovers in einem PDGPS-Referenznetz abzuschätzen, darf nicht nur der Betrag des Bahnfehlervektors betrachtet werden. Von den drei Bahnfehlerkomponenten – radial, tangential, normal – hat die tangentielle Komponente die größte Auswirkung in der Projektion der Satellitenbahn auf die Verbindungslinie Referenzstation – Rover. Für den PRN 19 zeigt Abb. 6.14 exemplarisch die Bahnfehlerkomponenten. Die tangentielle Komponente weist mit 2,2 m im Mittel die größten Abweichungen auf, gefolgt von den radialen Abweichungen mit 1,7 m. Die normale Komponente, die ohnehin den geringsten Einfluss auf die Echtzeitpositionierung hat, kann dagegen vernachlässigt werden.

Die Auswirkungen dieser Bahnfehler auf die differentielle Positionsbestimmung betragen, wenn man von der als zu pessimistisch betrachteten Bogenformel von Wells et al. (1986) ausgeht, weniger als 0,2 ppm über eine typische Referenzstationsentfernung von 50 km. In der Multistationslösung wird die Auswirkung des hoch korrelierten Bahnfehlers noch einmal reduziert.

### Troposphärischer Fehleranteil

Die Restfehler der troposphärischen Laufzeitverzögerung spiegeln sich in den geometrischen Flächenkorrekturparametern wider. Die Parameter der Interpolationsebene beschreiben die relativen Restfehler zwischen den Referenzstationen und umfassen Bahnfehler und troposphärische Fehleranteile. In Abb. 6.15 sind die Nord-Süd- und West-Ost-Komponenten zu einem  $a_0$ -Indexwert zusammengefasst:

$$a_0 = \sqrt{a_{0N}^2 + a_{0E}^2} \quad (6.1)$$

Die  $a_0$ -Indexwerte aller Satelliten betragen im Mittel 0,5 ppm. Berücksichtigt man einen maximalen Bahnfehleranteil von 0,2 ppm, verbleiben für die troposphärischen Restfehler ca. 0,3 ppm. Alle Messungen in der norddeutschen Tiefebene haben diese Größenordnung von 0,3 bis 0,6 ppm bestätigt.

Die detailliertere Betrachtung der  $a_0$ -Indexwerte für einen Satelliten an zwei aufeinanderfolgenden Tagen zeigt die charakteristische Abhängigkeit der troposphärischen Restfehler von der Satellitenelevation (Abb. 6.16). Bei annähernd gleichen Wetterbedingungen an beiden Tagen differieren die Indexreihen nur wenig.

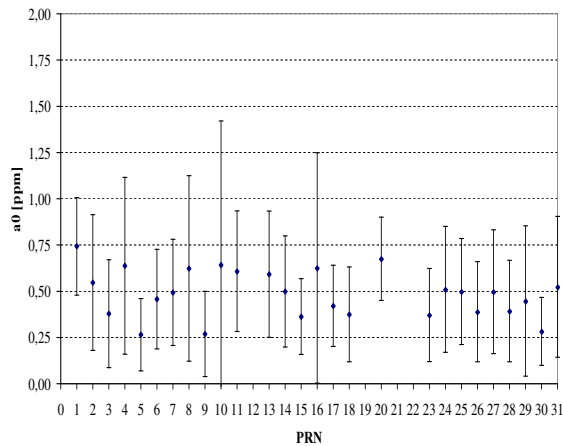


Abbildung 6.15: Mittelwert und Standardabweichung der  $a_0$ -Indexwerte aller Satelliten am DOY 057, 2003

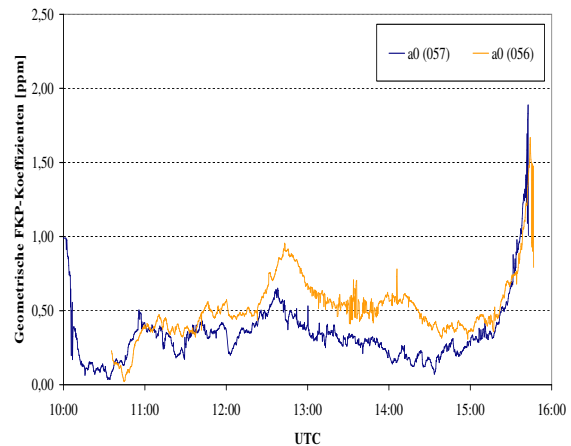


Abbildung 6.16: Vergleich der  $a_0$ -Indexwerte für den PRN 15 von DOY 056 und 057, 2003

### Satellitengeometrie

Die Genauigkeit der PDGPS-Positionierung  $\sigma_P$  hängt auch von der Satellitengeometrie ab, die durch den PDOP (Position Dilution of Precision) und weitere DOP-Werte beschrieben wird. Die Positionierungsgenauigkeit ergibt sich durch Multiplikation des PDOP-Faktors mit der Genauigkeit der einzelnen Pseudostreckenmessung  $\sigma_I$ :

$$\sigma_P = PDOP \sigma_I \quad (6.2)$$

Seitdem das GPS-Raumsegment voll ausgebaut ist, bewegen sich die PDOP-Werte im Normalfall zwischen 2 und 3. Mit 6–8 Satelliten über  $10^\circ$  Elevation ergeben sich bei freiem Horizont gute geometrische Voraussetzungen für die Positionsbestimmung. Dennoch sind vereinzelte Zeiträume zu beachten, in denen ungünstige Geometrien auftreten. So können sich die Satelliten mehrheitlich in einem schmalen west-östlich ausgerichteten Band bewegen oder einige Satelliten mit niedrigen Elevationswinkeln sind jeweils nur kurzzeitig sichtbar. Die Mehrdeutigkeitslösung sowohl im Referenznetz als auch des Rovers wird dadurch zum einen durch die schnellen Konfigurationswechsel und zum anderen durch den längeren Signalweg durch die Atmosphäre beeinträchtigt.

Anhand von Abb. 6.17 lässt sich für vorgegebene PDOP-Werte ermitteln, welche Positionierungsgenauigkeit  $s_P$  erzielbar ist, wenn eine Messgenauigkeit  $s_I$  der Trägerphasen je nach verwendetem Signal von 3–10 mm angenommen wird. Rechnet man Mehrwegeeffekte auf der Roverseite von bis zu 5 cm noch hinzu, kann sich die Genauigkeit drastisch verschlechtern. Umgekehrt lässt sich aus Abb. 6.17 schlussfolgern, dass für Vermessungen im Lagefestpunktfeld die geforderte Genauigkeit von  $\leq 2$  cm nur einzuhalten ist, wenn die aus Trägerphasenmessungen abgeleiteten Pseudoentfernungen und damit auch die Korrekturen genauer als 1 cm ermittelt werden. Dies kann über wenige Kilometer Abstand von einer Referenzstation hinaus nur durch Vernetzung gewährleistet werden.

#### 6.4.3.2 Ionosphärischer Fehleranteil

Die ionosphärischen Restfehler stellen den dominierenden Anteil der Fehler dar, die durch die Vernetzungsparameter repräsentiert werden müssen. Sie weisen ein höheres absolutes Niveau und eine deutlich höhere Variabilität gegenüber den geometrischen Vernetzungsparametern auf. Analog zur Betrachtung der troposphärischen Fehleranteile zeigt Abb. 6.18 die zum  $aI$ -Index zusammengefassten ionosphärischen FKP-Komponenten aller Satelliten eines Beobachtungstages. Mit einem Mittelwert von 0,9 ppm

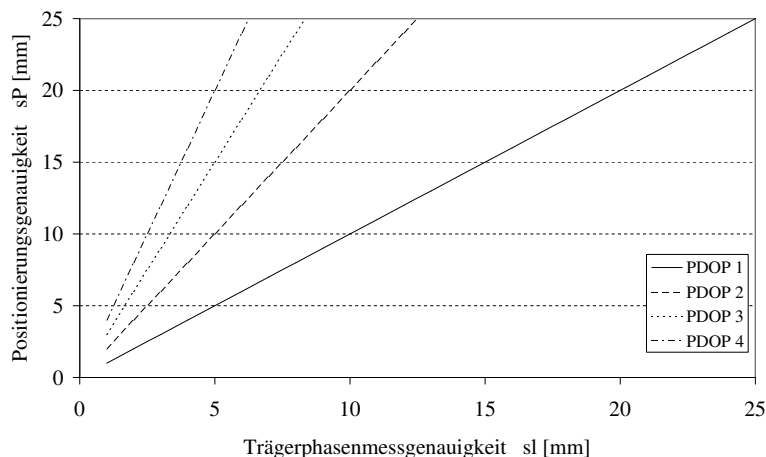
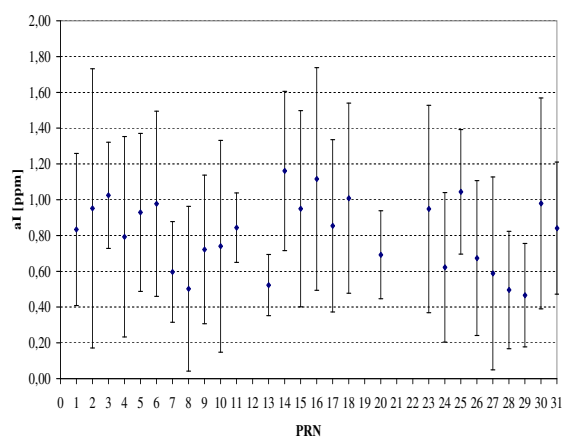
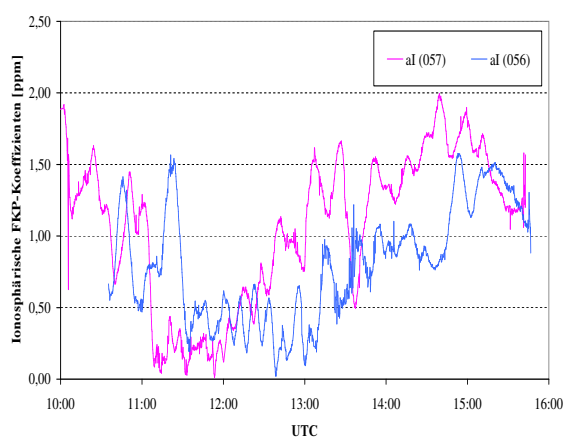


Abbildung 6.17: Einfluss der Satellitengeometrie auf die Positioniergenauigkeit

sind die im Referenznetz funktional nicht modellierbaren ionosphärischen Fehler vergleichsweise gering, sie weisen aber Variationen von mehr als 50% auf.

Die hohe Variabilität zeigt sich auch in den  $aI$ -Indexwerten des PRN 15 für die beiden aufeinanderfolgenden Beobachtungstage 056/057 in 2003 (Abb. 6.19). Nach Abzug des elevationsbedingten Trends sind die beiden Indexreihen nur sehr gering korreliert. Die kurzperiodischen Variationen lassen erkennen, dass eine Prädiktion der Vernetzungsparameter allenfalls über wenige Sekunden möglich und trotzdem mit großer Unsicherheit verbunden ist. In den Nachmittagsstunden steigen mit dem TEC der Ionosphäre auch die Netzkoeffizienten über 1 ppm an. Ohne Vernetzung würde dies unmittelbar in einen Positionierungsfehler gleicher Größenordnung münden und die PDGPS-Positionierung mit nur einer Referenzstation auf Entfernungen unter 10 km begrenzen.

Abbildung 6.18: Mittelwert und Standardabweichung der  $aI$ -Indexwerte aller Satelliten am DOY 057, 2003Abbildung 6.19: Vergleich der  $aI$ -Indexwerte für den PRN 15 von DOY 056 und 057, 2003

Nachdem der Sonnenzyklus 23 sein Maximum im Jahr 2002 überschritten hat, geht die Zahl und Intensität der ionosphärischen Störungen zurück. Im Jahr 2003 wird ein lokales Minimum erreicht (vgl. Abb. 6.2), was die niedrigen Werte der FKP-Parameter in den vorhergehenden Abbildungen erklärt. Eine umfassende Übersicht der Entwicklung der ionosphärischen Störungen gibt Wanninger (2002a) mit dem I95-Index. In Abb. 6.20 sind für den Zeitraum von 1998 bis 2004 als Funktion der Ortszeit die für Deutschland repräsentativen I95 in fünf Klassen von 0 bis über 9 ppm aufgetragen. Sehr gut zu erkennen

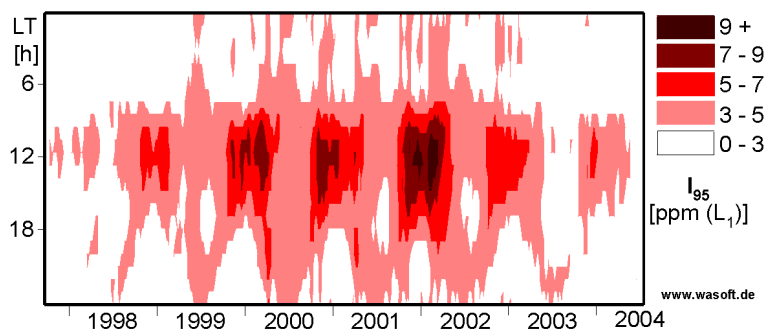


Abbildung 6.20: Entwicklung des I95-Index zwischen 1998 und 2004 (Quelle: www.wasoft.de)

ist zum einen die tageszeitabhängige Entwicklung der Indizes, zum anderen die Abhängigkeit von der Jahreszeit. Im Winter und Frühjahr treten deutlich höhere I95-Werte auf als im Sommer.

## 6.5 Untersuchungen in Brasilien

### 6.5.1 Projektziele

Die ersten Erfahrungen mit der Echtzeitvernetzung von GPS-Referenzstationen in Niedersachsen und Hamburg haben das Genauigkeitspotential aufgezeigt. Auch die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ließ sich trotz der noch notwendigen Entwicklungsarbeiten bereits abschätzen. Unsicher war jedoch, wie sich die zunehmende Sonnenaktivität mit dem für 2001/02 erwarteten Maximum des Sonnenzyklus 23 auf die Echtzeitvernetzung auswirken wird. Eine Möglichkeit, die Wirkung der an Häufigkeit und Intensität zunehmenden Sonneneruptionen auf die Ionosphäre und deren Wirkung auf GPS-Messungen zu studieren, besteht in den äquatorialen Regionen der Erde. Diese Regionen entlang des geomagnetischen Äquators sind durch starke regelmäßige und unregelmäßige ionosphärische Aktivitäten gekennzeichnet. Einen Referenznetzbetrieb unter solchen erschwerten Bedingungen zu untersuchen, war eines der Ziele eines Kooperationsprojektes im Rahmen der Wissenschaftlich-Technologischen Zusammenarbeit (WTZ) mit Brasilien, das vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF), mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) als Projektträger, gefördert wurde.

Weitere Ziele des Kooperationsprojektes waren die Konzipierung eines für Brasilien geeigneten Netzaufbaus mit einer auf die verfügbare Infrastruktur angepassten Hard- und Softwarearchitektur. Brasilien verfügt über ein Netz aus elf GPS-Permanentstationen (Abb. 6.21), die das kontinuierliche brasilianische Monitoring-Netz (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo, RBMC) bilden. Diese für Postprocessing-Anwendungen nutzbaren Referenzstationen wurden durch das SIRGAS (Sistema de Referencia Geocentrico para America del Sur)-Projekt initiiert, zu dessen Messung und Auswertung auch das IfE in einem früheren Kooperationsvorhaben beitrug. Mit Stationsabständen zwischen 500 und 1000 km ist das RBMC allerdings gegenwärtig ungeeignet für die präzise Echtzeitvernetzung. Der Aufbau größerer zusammenhängender regionaler Referenzstationsnetze scheidet aus wirtschaftlichen Gründen für ein so großes Flächenland wie Brasilien aus.

Da hohe Genauigkeiten im Bereich weniger Zentimeter für Anwendungen in z.B. der Landes- und Liegenschaftsvermessung, der Geodatenerfassung, dem Umweltmonitoring sowie für verschiedenste marine Positionierungs- und Navigationsaufgaben hauptsächlich in einzelnen dicht besiedelten und wirtschaftlich wichtigen Regionen gefordert sind, wurde ein Konzept für die Einrichtung lokaler aktiver Referenznetze mit nur wenigen Stationen entwickelt. Im Süden und im Nordosten Brasiliens wurde jeweils ein solches Referenznetz aufgebaut und in einem drei- bzw. vierwöchigen Testbetrieb für die Untersuchung verschiedener Fragestellungen genutzt. Der Aufbau und ausgewählte Ergebnisse aus dem Refe-

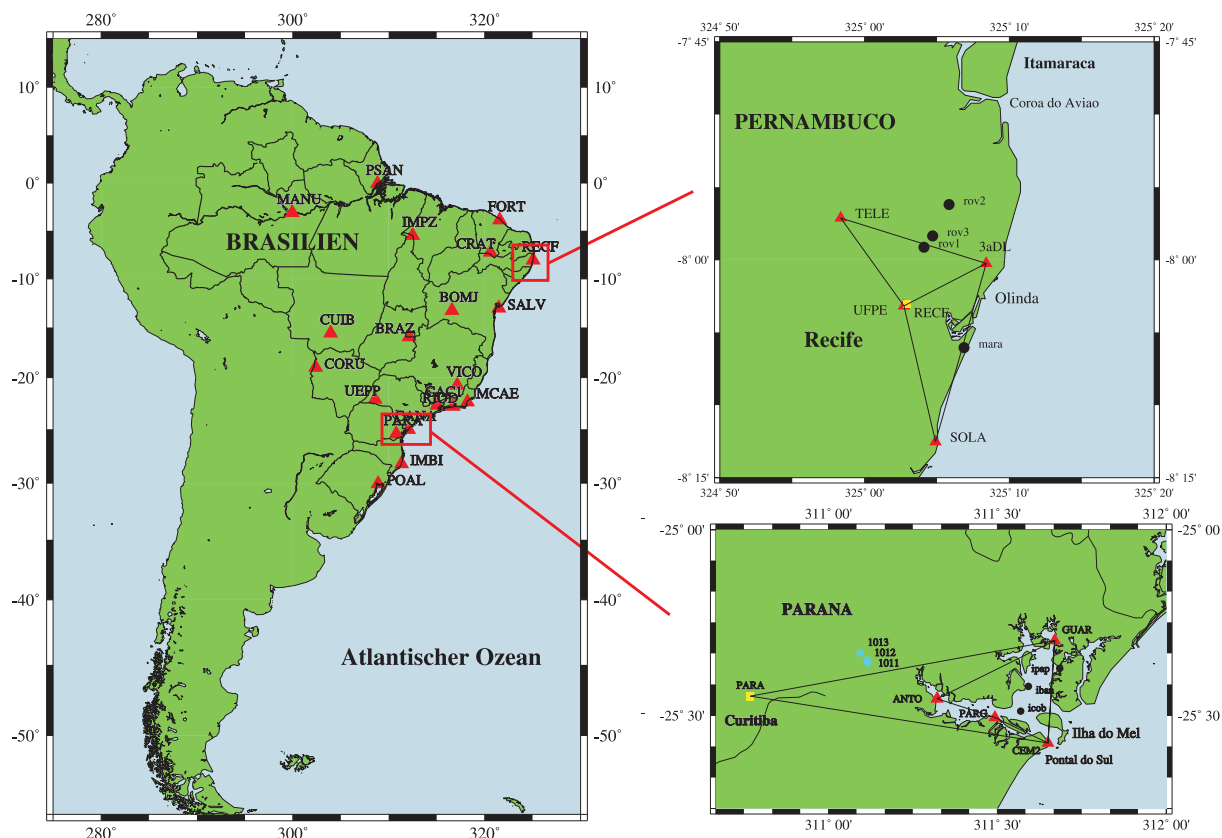


Abbildung 6.21: Brasilien mit RBMC-Stationen und Lage der Projektgebiete

renznetzbetrieb werden in den beiden nachfolgenden Abschnitten beschrieben. Ein darauf aufbauender Vorschlag für die Integration unabhängiger lokaler und regionaler Referenzstationsnetze in das weiträumige RBMC-Netz und damit der Aufbau einer landesweiten Echtzeitvernetzung für Brasilien und vergleichbar großen Ländern folgt in Kap. 7.

Ein wesentlicher Bestandteil beider Projektphasen war der Wissenstransfer. In abschließenden Seminaren in Pontal do Sul, Curitiba und Recife wurden Vertretern aus Wissenschaft, Verwaltung und Industrie die eingesetzten Verfahren und Technologien erläutert.

### 6.5.2 Netzarchitekturen

Im Rahmen des Kooperationsprojektes wurden mit Beteiligung der Universidade Federal de Paraná (UFPR) in Curitiba und der Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) in Recife zwei Referenzstationsnetze realisiert. Abbildung 6.21 zeigt die beiden 8° bzw. 25° südlicher Breite gelegenen Messgebiete mit den Referenzstationen und einige der permanenten Roverpunkte.

Das erste Netz wurde im April 1999 im Süden Brasiliens um die Bucht von Paranaguá aufgebaut. Die Vernetzungszentrale war mit dem Vernetzungsrechner und einem Korrekturdatensender in Pontal do Sul im Meeresbiologischen Forschungszentrum (Centro de Estudos do Mar, CEM) untergebracht. Drei weitere Referenzstationen befanden sich auf dem Hafengelände des im Bau befindlichen Ponta do Félix in Antonina (ANTO), in Paranaguá (PARG) auf einem Silo sowie im Umweltinstitut (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente, IBAMA) in Guaraqueçaba (GUAR). Die Referenzstationen waren überwiegend nur mit einem Boot erreichbar, ebenso wie die auf Inseln gelegenen Roverpunkte.

Während der knapp dreiwöchigen Messkampagne wurden zwei mobile Empfänger in der Bucht sowie auf der vorgelagerten Insel Ihla do Mel hauptsächlich für marine Anwendungen eingesetzt. Während die Rover Korrekturdaten einzelner Referenzstationen für die PDGPS-Positionierung empfangen konnten, unterlag der Korrekturdatentransfer zur Vernetzungszentrale erheblichen Störungen, so dass Echtzeit-Multistationslösungen nur zeitweise möglich waren. Einzelheiten zum Referenznetz und Ergebnisse der marinen Anwendungen wurden von den brasilianischen Kooperationspartnern veröffentlicht (Krueger et al. 2001a, Souza, Krueger 2002).

Das zweite Netz wurde im November 2000 in Recife, der drittgrößten, im Nordosten gelegenen Stadt Brasiliens eingerichtet (Willgalis et al. 2001). Die Vernetzung bestand wie im ersten Projekt ebenfalls aus vier Referenzstationen. Mit einem Durchmesser von 45 km umfasste die Netzmasche das gesamte Untersuchungsgebiet von Recife und den Küstenstreifen von Candeias bis nördlich von Olinda. Die Referenzstationen befanden sich auf hohen Gebäuden (SOLA) und Türmen, von denen einer (TELE) auf dem Werksgelände der Telekommunikationsfirma TELEBRAS und der andere innerhalb der Kaserne der 3. Topographieeinheit (3aDL) steht. Die Vernetzungszentrale war mit einer GPS-Referenzstation (UFPE) und dem Korrekturdatensender auf dem Messdach des Departamento de Engenharia Cartográfica (DeCart) untergebracht, einem zehnstöckigen Gebäude der Universidade Federal de Pernambuco. Auf dem Bibliotheksgebäude der Universität befindet sich die RBMC-Station RECF, deren Daten für Post-processingzwecke verwendet wurden, die aber nicht in die Vernetzung eingebunden werden konnten.

Entsprechend der in Kap. 5.3 beschriebenen Stationskonfiguration waren die Referenzstationen sowohl als RTK-Basis als auch für die Vernetzung nutzbar. Zu der Ausstattung gehörten Zweifrequenzempfänger mit absolutkalibrierten geodätischen Antennen, UHF-Funkmodems mit erhöhter Sendeleistung und ein PC mit den GNSMART-Softwaremodulen für die lokale Korrekturdatenberechnung und Kommunikation. Mit den von der Vernetzungszentrale empfangenen Korrekturdaten erfolgte die Multistationslösung und Berechnung des FKP-Korrekturmodells nach Kap. 4.3.4, das per VHF-Funk zentral für das gesamte Untersuchungsgebiet ausgestrahlt wurde. Die Höhe des Senders in Verbindung mit der vergleichsweise flachen Topographie Recifes ermöglichte einen weitreichenden Empfang. Das Universitätshochhaus ist damit ein idealer Standort für einen dauerhaften Referenzstationsdienst und eine gute Alternative zum Mobilfunk, der erst seit kurzem zur Korrekturdatenübertragung fähig ist.

Zusätzlich zur Untersuchung der Echtzeitvernetzung nach dem Konzept der Flächenkorrekturparameter wurden eine Reihe praktischer Problemstellungen bearbeitet. Dazu zählen die Automatisierung des Referenznetzbetriebes und die Optimierung der Korrekturdatenübertragung per Funk für das Stadtgebiet Recifes. Der Referenzdienst war zur Abdeckung des urbanen Gebietes von Recife einschließlich eines Küstenstreifens um Olinda (Abb. 6.21) angelegt. Die anwendungsorientierten Untersuchungen umfassten den Einsatz für Landesvermessungsaufgaben, im Liegenschaftskataster, zur Geodatenerfassung und zusätzlich noch zur Fahrzeugortung (Krueger et al. 2001b, Kewes 2001).

### 6.5.3 Ausgewählte Ergebnisse

Aufgrund der in den Norddeutschen Vernetzungsmaschen gewonnenen Erfahrungen wurden in den brasilianischen Projekten permanent beobachtende Rover bevorzugt eingesetzt. Besonders in Recife wurden Beobachtungspunkte innerhalb der Referenznetzmasche und über den Rand hinaus so ausgewählt, dass sie für bis zu sechs Stunden permanent Echtzeitlösungen gesammelt haben. Ein solcher permanenter Rover initialisiert automatisch 10 Sekunden nach jeder erfolgreichen Lösung vollständig neu, d.h. berechnet auch eine neue unabhängige Mehrdeutigkeitslösung. Soweit aufgrund von Störungen der Datenübertragung für Beobachtungsabschnitte keine Echtzeitlösungen vorliegen, wurden diese durch Echtzeitsimulation mit den archivierten RINEX-Beobachtungen und gespeicherten RTCM-Datenströmen nachträglich berechnet. Nachfolgend werden Ergebnisse des Vergleichs von RTK- und Netzlösungen sowie zur Genauigkeit, Schnelligkeit und Verfügbarkeit von Netzlösungen vorgestellt.

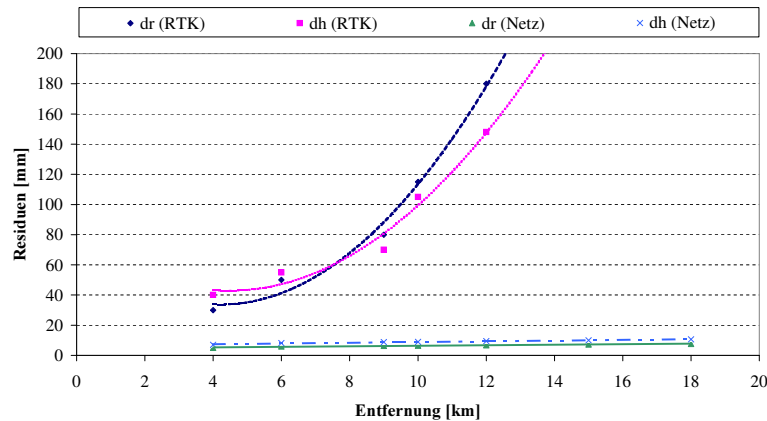


Abbildung 6.22: Entfernungsabhängigkeit von Einfrequenz-RTK-Lösungen im Vergleich zu Multistationslösungen im Referenznetz Recife 2000

Reine Einfrequenz-RTK-Lösungen waren im Regelfall nur über Entfernungen bis ca. 6 km erfolgreich, darüber hinaus gelangen Mehrdeutigkeitslösungen nur in wenigen Ausnahmefällen über Entfernungen von maximal 12 km. Über 80% der RTK-Lösungen benötigten mehr als 5 min zur Mehrdeutigkeitslösung und wiesen dann Abweichungen von über 10 cm von der Referenzkoordinate der Roverpunkte auf. Aus den wenigen erfolgreichen RTK-Lösungen lässt sich eine lineare Entfernungsabhängigkeit von 21 ppm für Abweichungen in der Lage und von 16 ppm für die Höhe abschätzen, wobei diese real allerdings nicht linear, sondern überproportional mit der Entfernung wachsen. Die Abb. 6.22 zeigt im Vergleich dazu die Lage- und Höhendifferenzen der Multistationslösungen, die im Mittel um 1 cm liegen. In den Residuen der sieben, teilweise über den Rand der Netzmasche hinausgehenden Roverpunkten mit einer maximalen Entfernung zur nächstgelegenen Referenzstation von 18 km verbleibt eine lineare Entfernungsabhängigkeit von 0,15 ppm in der Lagekomponente und 0,23 ppm in der Höhenkomponente.

Die nachfolgend diskutierten Ergebnisse beruhen auf den Beobachtungen der als permanente Monitorstation genutzten Referenzstation UFPE innerhalb der aus den drei Referenzstationen 3aDL, SOLA und TELE gebildeten Vernetzung. Die Echtzeitlösungen sind als simultane Zweifrequenzlösungen (LX-Lösungen) mit stochastischer Modellierung der ionosphärischen Residuen berechnet. Sie werden mit den im Postprocessing berechneten Referenzkoordinaten der Monitorstation verglichen. Die Elevationsmaske beträgt  $8,5^\circ$  für die Referenzstationen und  $10^\circ$  für die Monitorstation und alle weiteren Rover.

Am Beispiel eines typischen Beobachtungstages (DOY) 320 in der GPS-Woche 1088 (15. November 2000) zeigt Abb. 6.23 die absoluten Residuen, d.h. die Abweichungen der Echtzeitlösungen von der Solllösung, zwischen 0 und 5 cm, in Intervalle von 1 cm eingeteilt. Aufgetragen sind die relative Häufigkeit  $H$  (linke Y-Achse) und die Summenhäufigkeit  $SH$  (rechte Y-Achse) für die Residuen in den beiden Lagekomponenten Nord und Ost sowie für die Resultierende  $dr$  der Lagekomponenten. 90% aller Lösungen weichen in der Horizontalen um weniger als 2 cm von der Solllösung ab und erfüllen damit eine wichtige Anforderung z.B. für Liegenschaftsvermessungen. Über 70% der horizontalen Komponenten sind sogar genauer als 1 cm. Etwa 1% aller Echtzeitlösungen müssen mit Lageabweichungen von über 10 cm als Ausreißer betrachtet werden.

Die Verteilung der Höhenresiduen  $dh$  für die vorgenannten Echtzeitlösungen zeigt Abb. 6.24. In der Höhenkomponente sind 55% aller Lösungen besser als 2 cm, knapp 90% bleiben unterhalb des Grenzwertes von 5 cm. Für schnelle und einfache Höhenbestimmungen reicht die Echtzeitpositionierung damit aus, sie ist aber selbst über Entfernungen von 30–40 km nicht konkurrenzfähig zum Nivellement. Für die präzise Höhenübertragung sind statische, postprozessierte GPS-Lösungen vorzuziehen.

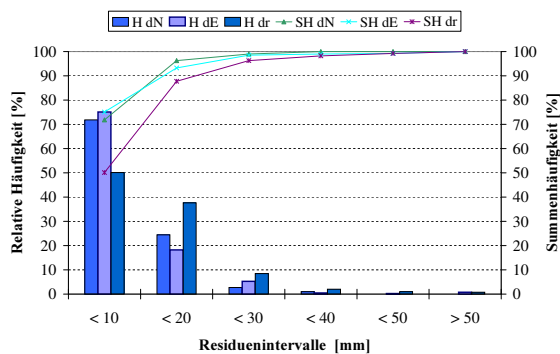


Abbildung 6.23: Positionierungsergebnisse für den Rover UFPE innerhalb des Referenznetzes 3aDL, SOLA, TELE

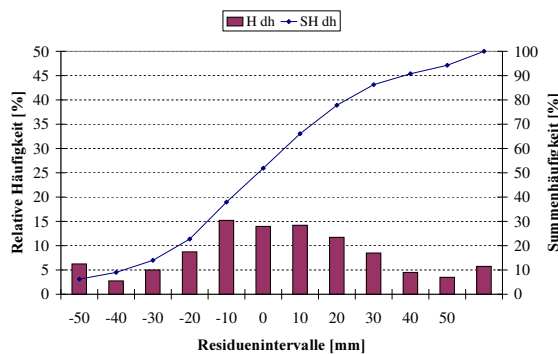


Abbildung 6.24: Verteilung der Höhenresiduen für Echtzeitlösungen des Rovers UFPE

Nach der Verteilung der Residuen ist die Zeit, die zur Mehrdeutigkeitslösung benötigt wird (TTFA), ein zweiter wichtiger Parameter zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit der Echtzeitpositionierung. Für den zuvor beschriebenen Datensatz zeigt Abb. 6.25 die Verteilung der TTFA-Werte, wiederum als Häufigkeitsverteilung über Zeitintervalle von 30 s bis zu einem Grenzwert von 5 min. Danach benötigt die Hälfte aller Lösungen weniger als 1 min und in maximal fünf Minuten sind 83% aller Mehrdeutigkeitslösungen erfolgreich abgeschlossen. Die verbleibenden 17% aller Lösungen benötigen mit 15–30 min deutlich mehr Zeit. Derart lange Beobachtungszeiten haben jedoch keine praktische Bedeutung mehr für die Echtzeitpositionierung. Dafür ist der wirtschaftliche Vorteil gegenüber den schnellen statischen Messverfahren mit anschließendem Postprocessing im Feld zu gering.

Abschließend ist noch zu klären, in welchem Zusammenhang lange TTFA-Zeiten mit der Genauigkeit der Lösungen stehen. Hier gilt, dass Mehrdeutigkeitslösungen, die länger als fünf Minuten benötigen, nicht ungenauer sein müssen als deutlich schnellere Lösungen. Aber die Wahrscheinlichkeit eines Ausreißers steigt eindeutig mit langen TTFA-Zeiten, die in der Regel auf eine vorübergehend ungünstige Satellitenkonstellation oder starke Mehrwegeeinflüsse zurückzuführen sind. Deshalb sollten Lösungsversuche nach 5 min abgebrochen und die Messung zu einem späteren Zeitpunkt, frühestens nach 30-60 Minuten, wiederholt werden.

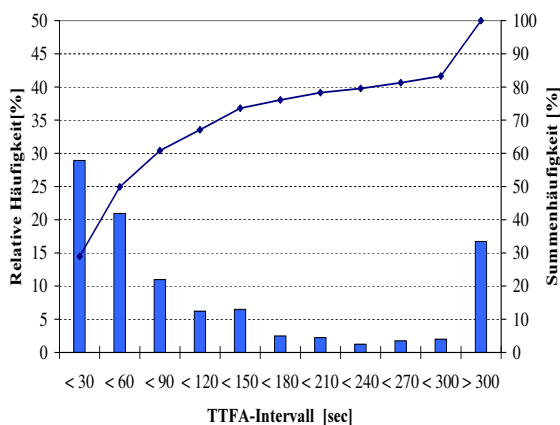


Abbildung 6.25: Dauer der Mehrdeutigkeitslösungen (TTFA) für den Rover UFPE

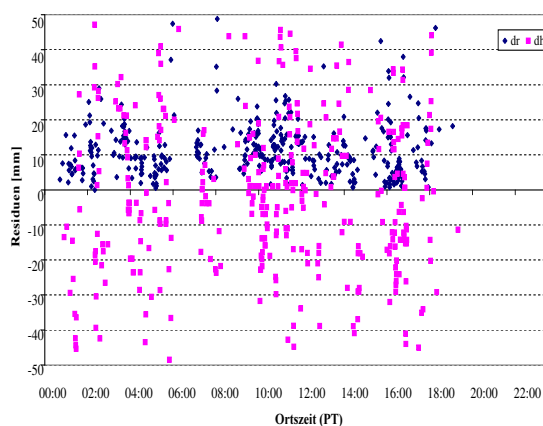


Abbildung 6.26: Verfügbarkeit von Echtzeit-Multistationslösungen abhängig von der lokalen Beobachtungszeit

Rund 15% aller Mehrdeutigkeitslösungen benötigen, wie zuvor gezeigt, mehr als 5 min, etwa 5% führen zu keiner erfolgreichen Lösung. Diese Fälle treten immer zu bestimmten Tagesabschnitten auf, in Brasilien sind sie besonders mit dem Sonnenauf- und Sonnenuntergang korreliert. Einen extremen Fall zeigt



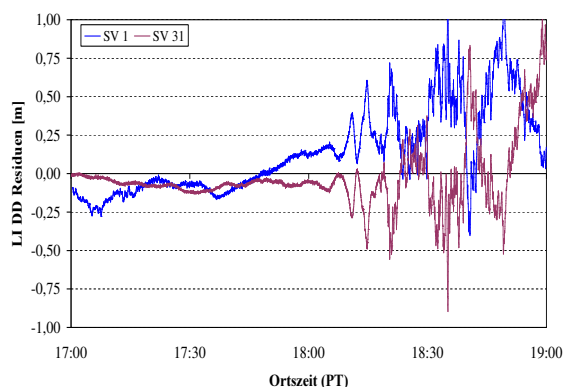


Abbildung 6.27: Anstieg der LI-Doppeldifferenzresiduen nach Sonnenuntergang

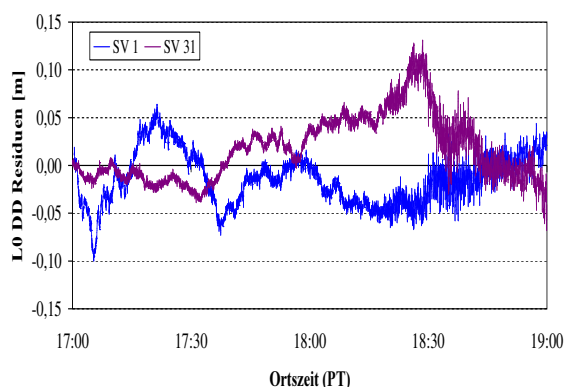


Abbildung 6.28: L0-Doppeldifferenzresiduen

Abb. 6.26. Wie an der Verteilung der als Funktion der lokalen Beobachtungszeit dargestellten Residuen ( $dr$ ,  $dh$ ) erkennbar, werden in den frühen Morgenstunden und am Vormittag Lösungen schnell hintereinander produziert. Nach dem Sonnenaufgang gegen 5:30 Ortszeit und mit dem Sonnenuntergang gegen 18:00 sind Echtzeit-Multistationslösungen dagegen für eine gewisse Zeit nicht mehr möglich. Verursacht wird dies durch hohe Gradienten des Elektronengehaltes der Ionosphäre. Nach Sonnenuntergang homogenisiert sich die Elektronenverteilung nur langsam, so dass die Referenzstationsvernetzung erst nach Mitternacht wieder in den normalen Betrieb zurückkehrt. Die in Abb. 6.26 dargestellten Residuen des Lagevektors  $dr$  und der Höhenkomponente  $dh$  weisen, solange Echtzeitlösungen möglich sind, keine erkennbare Abhängigkeit von der Beobachtungszeit auf. Die Mehrheit der Lagerresiduen bleibt unter 2 cm, während die Höhenresiduen innerhalb des Grenzwertes von  $\pm 5$  cm normalverteilt sind.

Der Einfluss der Ionosphäre lässt sich durch eine eingehendere Betrachtung der Residuen der ionosphärischen (LI) und der ionosphärenfreien (L0) Linearkombination zeigen, die in Abb. 6.27 und Abb. 6.28 dargestellt sind. Die LI-Doppeldifferenzresiduen über der Basislinie UFPE-TELE (15 km) mit den Satellitenpaaren SV 3-1, 3-31 steigen nach Sonnenuntergang gegen 18 Uhr Ortszeit auf bis zu einem Meter an und variieren um fast 50 ppm innerhalb von 10 Minuten. Das Auswertemodell kann diesen starken Veränderungen kaum folgen und auch die Empfänger verlieren durch Szintillationen den Signalkontakt. Daraus folgende häufige Phasensprünge verzögern die Mehrdeutigkeitslösungen erheblich und können diese letztendlich sogar ganz verhindern. Die geometrische Linearkombination L0 weist im wesentlichen nur ein höheres Rauschen auf, das durch die niedrigen Satellitenelevationen mitverursacht wird.

Die hohen Gradienten spiegeln sich in den Rate of TEC (RoT) Zeitreihen wieder, die die Änderungen des Elektronengehaltes pro Minute zeigen. Im Vergleich zu einer Zeitreihe für Hannover (Abb. 6.29), in der sich Szintillationen durch erhöhtes Rauschen bemerkbar machen, zeigt Abb. 6.30 die extrem hohen Änderungsraten von bis zu 5 TEC/min kurz nach 18 Uhr Ortszeit, die sich nach Mitternacht deutlich reduzieren und erst nach 6 Uhr bis zum Mittag wieder normale Verhältnisse annehmen. Dieses für die Region charakteristische Verhalten wird auch von Wanninger (1993) und anderen Autoren bestätigt. So weisen Fortes et al. (2000) auf erhebliche Probleme mit dem L2-Tracking aufgrund von Szintillationen hin, von denen Trimble SSi mit Codeless L2-Tracking deutlich stärker betroffen sind als die in den Projekten hauptsächlich eingesetzten Ashtech Z-XII, die mit einem Semi-codeless L2-Tracking arbeiten. Sie haben alleine zur Lösung der Widelan-Mehrdeutigkeits Beobachtungsintervalle von 40 Minuten und mehr benötigt und konnten nicht mehr als 15% der L1-Mehrdeutigkeits lösen.

Neben der Ionosphäre als wesentlichem leistungsbeeinflussenden Faktor hängen die im Referenzstationsnetz erzielbaren Lösungen auch von der Satellitengeometrie ab. Wichtig ist zunächst einmal eine ausreichende Anzahl an Satelliten, für die Flächenkorrekturparameter vorliegen. Dazu müssen die Mehrdeutigkeits der Trägerphasenmessungen zu einem Satelliten zuerst im Referenznetz gelöst werden. Die Mehrdeutigkeitsalgorithmen setzen ein, sobald ein Satellit über den Horizont steigt und sollen ab etwa

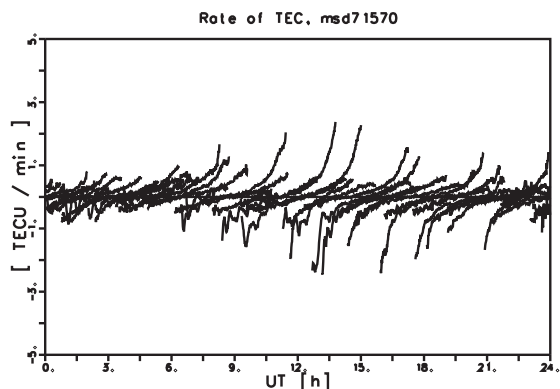


Abbildung 6.29: Rate of TEC für Station msd7, Hannover DOY 157, 1999 (Willgalis, Jahn 1999)

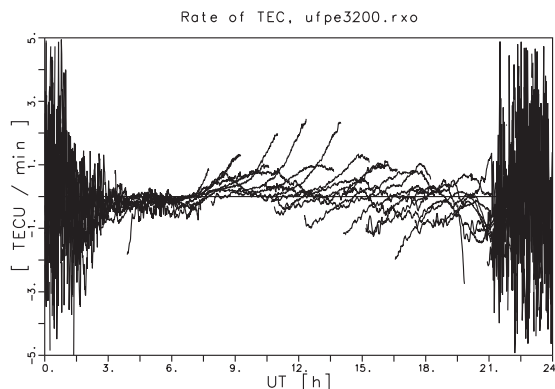


Abbildung 6.30: Rate of TEC für Station UFPE, Recife DOY 320, 2000

8° Elevation zuverlässige Integerwerte bereitstellen. Die frühzeitige Berechnung und Ausstrahlung der FKP ist Voraussetzung für die Mehrdeutigkeitslösungen der Rover, die in der Praxis mit einem Elevationswinkel von 10° arbeiten.

Da nicht für alle sichtbaren Satelliten die Mehrdeutigkeitslösung sofort gelingt, kann die Zahl der Satelliten, für die Flächenkorrekturparameter zur Verfügung stehen, unter der Gesamtzahl liegen. Dadurch stehen bei 8–10 Satelliten, die sich über dem Horizont befinden, im Durchschnitt nur für 6–7 Satelliten Flächenkorrekturparameter zur Verfügung (Abb. 6.31). In der hier vorgestellten Untersuchung wurden 70% aller Lösungen mit nur 6 GPS-Satelliten berechnet. Über den DOP-Wert kann dies die Genauigkeit der Echtzeitleistung des Rovers beeinträchtigen und die Verfügbarkeit von Echtzeitleösungen verringern, wenn zusätzlich größere Abschattungen in der Umgebung des Rovers vorkommen. In Echtzeitsimulationen können Synchronisationsprobleme der Korrekturdatenströme diesen Effekt verstärken, so dass FKP erst ab Elevationen von 10° bis 15°, in Ausnahmefällen auch erst ab 20° bis 25° verfügbar sind.

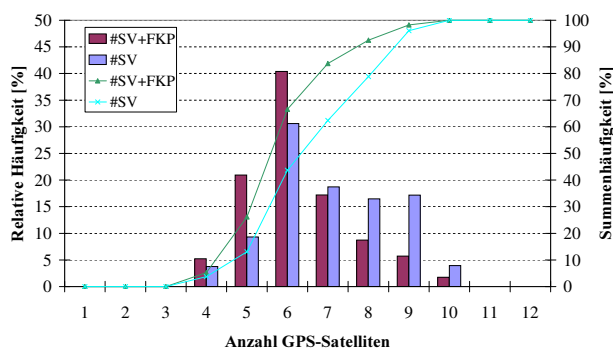


Abbildung 6.31: Gegenüberstellung der Anzahl sichtbarer GPS-Satelliten (#SV) und der Satelliten, für die Flächenkorrekturparameter verfügbar sind (#SV+FKP)

Die Standardabweichung einer Position ist eine Funktion der Standardabweichung einer Entfernungsmessung und den DOP-Werten. Die DOP-Werte repräsentieren im wesentlichen die Verteilung der über dem Horizont befindlichen Satelliten und beschreiben den Einfluss der Satellitengeometrie auf die Positionsbestimmung. Dieser Einfluss zeigt sich erwartungsgemäß in Abb. 6.32 am Beispiel der Höhenresiduen. Sie nehmen mit wachsenden VDOP-Werten zwischen 1,8 und 5 zu, von ± 2 cm bis ± 8 cm. Eine vergleichbare Korrelation zwischen den Lagerresiduen und dem HDOP ist erkennbar, aber deutlich weniger ausgeprägt. Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen bestehen zwischen den TTFA-Werten und den DOP-Werten keine Abhängigkeiten (Abb. 6.33).

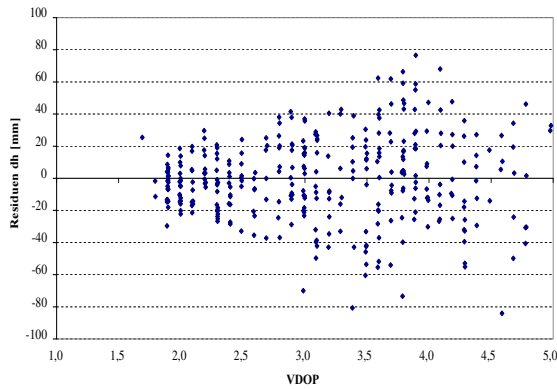


Abbildung 6.32: Abhängigkeit der Höhenresiduen vom VDOP

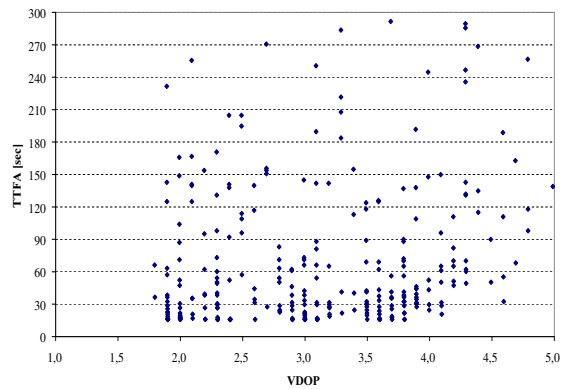


Abbildung 6.33: Zusammenhang zwischen TTFA und VDOP

Die in diesem Abschnitt diskutierten Ergebnisse basieren auf einer simultanen Zweifrequenzausgleichung, bei der die ionosphärischen Restfehler stochastisch modelliert werden. Wie von Euler, Ziegler (2000) gezeigt, wird dabei die zenitale ionosphärische Laufzeitverzögerung mit einem Parameter für jede Satelliten-Empfänger-Kombination abgebildet auf die einzelne Verbindungslinie zwischen Empfänger und Satellit. Dies ermöglicht die Modellierung kleinräumiger ionosphärischer Störungen, die im regionalen Ionosphärenmodell nicht erfasst werden können. In Abb. 6.34 sind die Auswirkungen auf die Positionsschätzungen ablesbar, wenn die stochastische Modellierung der Restionosphäre eingeführt wird. Die Auswirkungen auf die Dauer der Mehrdeutigkeitslösungen zeigt Abb. 6.35. Die Standardabweichung der Lagerresiduen wird dadurch halbiert und die Mehrdeutigkeitslösung drastisch beschleunigt.

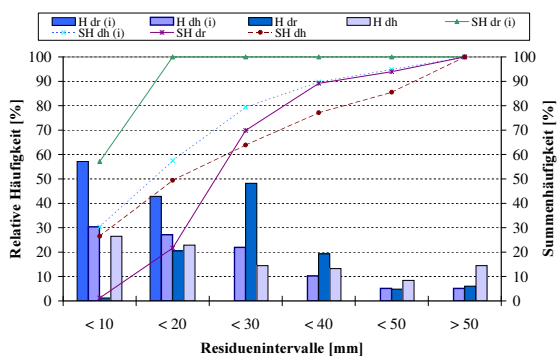


Abbildung 6.34: Verbesserung der Positionierungsgenauigkeit durch stochastische Modellierung der Restionosphäre. Dargestellt sind die Lage- und Höhenresiduen (dr, dh) ohne und mit stochastischer Ionosphärenmodellierung (i).

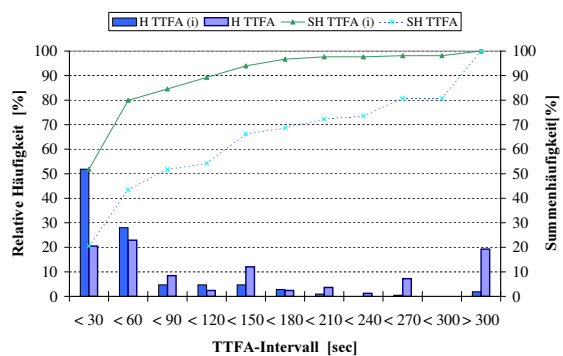


Abbildung 6.35: Beschleunigung der TTFA durch stochastische Modellierung der Restionosphäre

An den Flächenkorrekturparametern sind die systematischen entfernungsabhängigen Fehleranteile ablesbar. Durch die Trennung in eine geometrische Ebene und in eine ionosphärische Ebene lässt sich besonders der Anteil der ionosphärischen Aktivität und deren zeitliche Variation erkennen. In Abb. 6.36 sind die vier FKP-Koeffizienten der beiden Ebenen für den Satellit 13 (links) und den Satellit 17 (rechts) dargestellt. Der in den Nachtstunden zwischen 23 und 3 Uhr Ortszeit sichtbare Satellit 13 erreicht Maximalwerte von bis zu 30 ppm in den ionosphärischen Koeffizienten mit kurzzeitigen Variationen von über 10 ppm. In den Tagesstunden zwischen 9 und 16 Uhr Ortszeit kann dagegen der regelmäßige ionosphärische Anteil bereits in der Multistationslösung besser modelliert werden, so dass die verbleibenden entfernungsabhängigen Anteile sich in den beiden ionosphärischen Flächenkorrekturparametern nur mit maximal 7 ppm auswirken. Charakteristisch sind aber auch hier die für äquatoriale Regionen typischen hochfrequenten Variationen. In den geometrischen Koeffizienten zeigt sich der Einfluss der Troposphä-

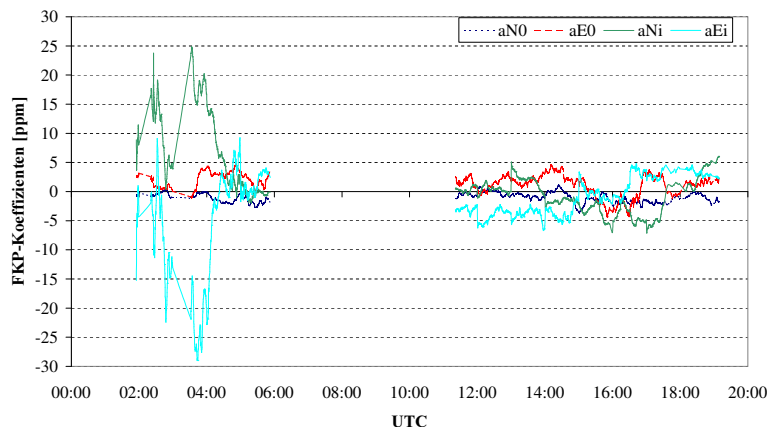


Abbildung 6.36: Flächenkorrekturparameter der Satelliten PRN 13 (links) und PRN 17 (rechts)

re auf die Signale bei niedrigen Satellitenelevationen, von der Ortszeit sind sie dagegen unabhängig. Sowohl für den Satellit 13 als auch für den Satellit 17 bleiben die Koeffizienten unter 5 ppm.

## 6.6 Anwendungen für Referenzstationsdienste

### 6.6.1 Anwendungsbereiche

Seit der Einführung des GPS haben sich eine Vielfalt von Anwendungen mit sehr unterschiedlichen Anforderungen an die räumliche und zeitliche Verfügbarkeit von Positionslösungen sowie an die Positionierungsgenauigkeit entwickelt. Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen vom Dezimeter- bis in den Millimeterbereich profitieren überwiegend von der Verfügbarkeit von Referenzstationsdiensten. Die Messaufgaben können schneller und damit wirtschaftlicher erledigt werden, bereits im Feld erfolgt die Kontrolle, ob die Messungen erfolgreich abgeschlossen werden können und die angestrebte Genauigkeit erreicht wurde. Einige Messaufgaben, wie Absteckung, Navigation oder Steuerung, werden überhaupt erst durch die Verfügbarkeit der präzisen Echtzeitpositionierung realisierbar. Zu den wesentlichen Anwendungsbereichen für Referenzstationsdienste zählen:

- Landesvermessung
- Liegenschaftsvermessung, Flurbereinigung
- Ingenieurvermessung (Absteckungen, Deformationsmessungen, Maschinensteuerung)
- Geodynamik
- Hydrographie
- Präzisionsnavigation (Land- und Wasserverkehr)
- GIS-Vermessungen
- Vermessungen für Geo-, Leitungs-, Straßen- und Umweltinformationssysteme
- Precision Farming
- geophysikalische Exploration
- Bestimmung troposphärischer Parameter (Wetterdienst)

Aufgrund der Grenzen, die der präzisen Echtzeitvermessung in Bezug auf Verfügbarkeit und Genauigkeit der Lösungen gesetzt sind, wird in Kap. 6.6.2 am Beispiel typischer Vermessungsaufgaben das Anwendungspotential verschiedener GPS-Positionierungsverfahren verglichen. Reale Ergebnisse aus AP-Netzmessungen zeigen in Kap. 6.6.3 das gegenwärtig erzielbare Genauigkeitsniveau im SAPOS-Referenzstationsnetz.

Unabhängig von der Positionierungsmethode stellt sich bei allen GPS-Vermessungen immer wieder die Aufgabe, die GPS-Lösungen durch Koordinatentransformationen mit dem amtlichen Bezugssystem in Verbindung zu bringen. Ein für die LGN entwickelter Transformationsansatz wird in Kap. 6.6.4 vorgestellt.

### 6.6.2 Einsatz für Vermessungsaufgaben

Durch präzise Echtzeitpositionierung in Referenzstationsnetzen wird für Liegenschafts- und andere Vermessungen der Anschluss an das amtliche Bezugssystem realisiert, indem Koordinaten für temporäre Anschlusspunkte (tAP) für die elektronische Tachymetrie bestimmt werden. Das Verfahren der freien Stationierung erlaubt dabei eine sehr flexible Wahl eines möglichst abschattungsfrei gelegenen tAP. Gerade bei Detailvermessungen ergänzen sich die beiden Messverfahren, die PDGPS-Positionierung und die Tachymetrie, besonders gut. Die Kombination von GPS und konventionellen Vermessungsverfahren wird auch in Zukunft von Bedeutung sein, da Gebäude, Bäume und Kraftfahrzeuge oftmals Hindernisse für die GPS-Signalausbreitung darstellen oder als Reflektoren Mehrwegeausbreitungen verursachen. Unter solchen schwierigen Bedingungen ist der Vorteil der Echtzeitpositionierung gegenüber den Postprocessing-Verfahren, dass der Nutzer sehr schnell im Feld Informationen erhält, ob PDGPS-Messungen überhaupt möglich sind.

Solange die GPS-Signale nicht durch Abschattungen gestört werden, ist auch die direkte Aufnahme von beispielsweise Grenzpunkten oder topographischen Objekten möglich, ebenso wie die Absteckung von Punkten. Wiederum ist die Echtzeitfähigkeit des GPS-Systems für den Nutzer von wesentlicher Bedeutung, kann dieser doch bei einem automatisierten Datenfluss zu z.B. einer GIS-Datenbank oder einer elektronischen Karte die aufgenommenen Objekte sofort im Feld visualisieren, noch fehlende Objekte identifizieren und grobe Fehler unmittelbar erkennen und korrigieren.

Tab. 6.2 gibt eine Übersicht der in der Praxis eingesetzten GPS-Positionierungsverfahren und beurteilt ihre Eignung für wesentliche Aufgaben der Detailvermessung (Willgalis et al. 2002). Bei den meisten Vermessungsaufgaben sind die Echtzeitverfahren, sowohl klassische RTK-Systeme als auch Referenzstationsdienste, von Vorteil, weil sie entweder wie bei allen Absteckaufgaben die sofortige Rückmeldung über jede Koordinatenlösung erfordern oder die Objektaufnahme erleichtern. Konventionelle RTK-Vermessungen teilen diese Vorteile der Echtzeitlösungen und sind darüber hinaus unabhängig von einem kostenpflichtigen Referenzdienst, sind aber zugleich aufgrund der entfernungsabhängigen GPS-Fehler in ihrem Arbeitsbereich stark eingeschränkt. Außerdem muss für jede RTK-Vermessung immer erst ein Anschluss an das amtliche Bezugssystem hergestellt werden.

Postprocessing-Verfahren sind bei allen Vermessungsaufgaben mit höheren Anforderungen an die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Lösungen weiterhin empfehlenswert. Dazu gehören die großräumigen Grundlagenvermessungen und Netzverdichtungen, soweit diese überhaupt noch durchgeführt werden. Insbesondere die hohen Genauigkeitsanforderungen an Höhenübertragungen erfordern weiterhin längere statische Beobachtungen und Postprocessingauswertungen. Für die GPS-Höhenbestimmung ist es, im Gegensatz zu den sonstigen Vermessungen in Echtzeit, unverändert notwendig, die Beobachtungsstandorte und -zeiten im voraus zu planen und die Antennenhöhen mit größter Sorgfalt und mehrfachen Kontrollen zu messen.

### 6.6.3 Ergebnisse aus AP-Netzmessungen

Im Zusammenhang mit Liegenschaftsvermessungen werden die höchsten Genauigkeitsanforderungen an die Koordinaten der Anschlusspunkte gestellt. Deren Bestimmung zählt zu den Hauptaufgaben des SAPOS-HEPS-Dienstes, nachdem die aktiven SAPOS-Referenzstationen das amtliche Bezugssystem realisieren und auf den weiteren kostenträchtigen Ausbau und die Erhaltung des vermarkten AP-Netzes

Tabelle 6.2: Eignung verschiedener GPS-Positionierungsmethoden für die wichtigsten Vermessungsaufgaben (+ gut geeignet, o bedingt geeignet, - ungeeignet)

Positionierungsmethode Anwendung	Postprocessing-Verfahren		Echtzeitverfahren	
	Statisch Schnelle Statik	Stop&Go Kinematik	RTK	Vernetzung
Grundlagenvermessungen	+	o	-	+
AP-Netzmessungen	+	o	o	+
Katastervermessungen	-	o	o	+
Topographische Aufnahmen	-	o	o	+
Großmaßstäbige GIS-Aufnahmen	-	o	o	+
Gebäudevermessungen <sup>(1)</sup>	-	-	o	+
Absteckungen	-	-	o	+
Höhenübertragungen	+	-	-	o

1) in Verbindung mit elektronischen Tachymetern

verzichtet wird. Im folgenden werden aktuelle Ergebnisse von AP-Bestimmungen mit dem vernetzten HEPS-Dienst vorgestellt. Die Messungen erfolgten im Juli 2004 nach dem Verfahren der Virtuellen Referenzstation, die Korrekturdatenübertragung entsprechend per Mobilfunk. Beobachtet wurden AP auf Stativen mit Zwangszentrierung, es kamen Trimble-Empfänger 4800 und 5700 sowie die Auswertesoftware DCTools zum Einsatz.

Die HEPS-Messungen erfolgten nach der SAPOS-Arbeitsanweisung Niedersachsen in zwei Aufstellungen mit jeweils mindestens drei oder mehr unabhängigen Initialisierungen. Aus dem Mittelwert der ersten und der zweiten Aufstellung wird ein Gesamtmittel gebildet. Für Aufnahmepunkte betragen nach der Niedersächsischen SAPOS-Arbeitsanweisung die größten zulässigen Abweichungen:

- max. 12 mm ( $v_R, v_H$ ) für die Differenz des Gesamtmittels zum Mittelwert einer Aufstellung
- max. 12 mm ( $v_R, v_H$ ) für die Differenz des Mittelwertes einer Aufstellung zum Einzelwert
- max. 20 mm ( $v_L$ ) für die Differenz eines Sollwertes zum Gesamtmittel.

Die ETRS 89-Sollkoordinaten der Kontrollpunkte enthalten Restfehler aus der Koordinatentransformation zwischen dem ETRS 89 (LS 389), dem Bezugssystem der SAPOS-Messungen, und dem amtlichen Bezugssystem LS 100.

Der Mittelwert der Abweichungen an den 5 Kontrollpunkten beträgt 10 mm mit einer maximalen Differenz von 17 mm. Die Mittelwerte von zwei unabhängigen Aufstellungen weichen vom Gesamtmittel im Durchschnitt um 5 mm ab und bleiben mit einem Maximalwert von 10 mm unterhalb der größten zulässigen Abweichungen von 12 mm (Abb. 6.37). Die Streuung  $v_L$  der 426 unabhängigen Einzelmessungen gegenüber dem Mittelwert der Aufstellung betragen im Mittel 4 mm, 95% aller Abweichungen bleiben unterhalb von 9 mm (Abb. 6.38). Demgegenüber ermittelt die Auswertesoftware eine um den Faktor 2–3 optimistischere Standardabweichung der Einzelmessung, die für 80% aller Lösungen mit kleiner 3 mm angegeben wird.

Zu den wenigen Messungsparametern, die dem Nutzer zur Einschätzung seiner Messungen zur Verfügung stehen, gehören der PDOP oder die Anzahl der beobachteten Satelliten. Erwartungsgemäß ist der PDOP eine Funktion der Anzahl der Satelliten (Abb. 6.39). Mit zunehmender Anzahl an verfügbaren Satelliten sinkt der PDOP. Aus dem PDOP lassen sich für die vorliegenden Ergebnisse keine Rückschlüsse auf die Genauigkeit der Lösungen ziehen. Die unabhängigen Lösungen für die Lage ( $v_L$ ) weisen Abweichungen bis zu 12 mm auf, ohne nennenswerte Korrelationen mit dem PDOP aufzuweisen, der zwischen 1,7 und 5,3 beträgt (Abb. 6.40).

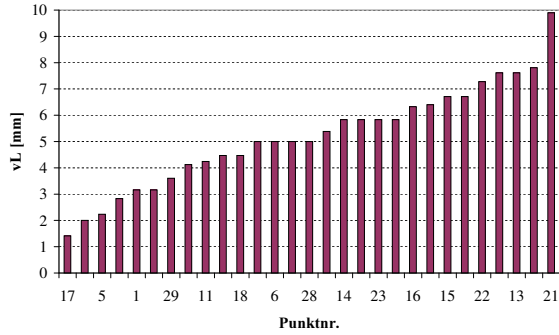


Abbildung 6.37: Abweichungen ( $v_L$ ) der Mittelwerte von zwei unabhängigen Aufstellungen zum Gesamtmittel

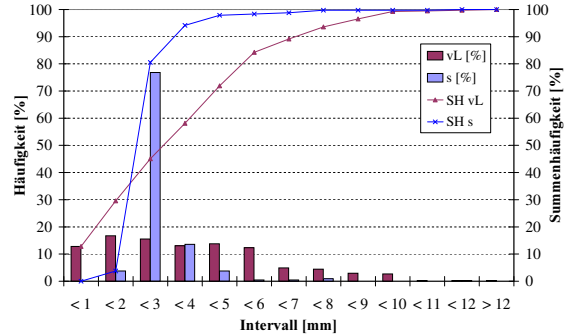


Abbildung 6.38: Die tatsächlichen Abweichungen ( $v_L$ ) der Einzelmessungen sind um den Faktor 2–3 größer als die vom Empfänger angegebene Standardabweichung ( $s$ ) der HEPS-Lösungen

Die vorgestellten Ergebnisse sind insofern zu relativieren, als nur die als richtig akzeptierten Lösungen in die Analyse einbezogen werden konnten. Unberücksichtigt bleiben etwa 10% der Messungen, von denen die eine Hälfte zu keiner oder zu einer grob falschen Lösung geführt und die andere Hälfte der Lösungen die mit 20–30 mm die zulässigen Abweichungen leicht überschritten hat.

**6.6.4 Koordinatentransformation mit Xtra**

Durch präzise Echtzeitpositionierung werden zunächst nur die Koordinaten der Empfängerantenne eines Nutzers innerhalb eines Netzes von GPS-Referenzstationen bestimmt. Diese Koordinaten liegen im Bezugssystem der Referenzstationen vor, bei dem es sich nach dem RTCM SC-104 Standard im Regelfall um das WGS 84 handelt oder ein anderes globales geozentrisches Koordinatensystem wie dem ITRF oder dem ETRF 89. Die Nutzer sind dagegen im allgemeinen an die konventionellen geodätischen, amtlichen Bezugssysteme der Landesvermessungen gebunden, auf das sich alle Festpunkte, Liegenschaftsvermessungen, Karten und sonstigen Geoinformationen beziehen. In Niedersachsen handelt es sich bei dem amtlichen Bezugssystem um das LS 100, das ab 2006 auf das ETRS 89 umgestellt werden soll, womit das Transformationsproblem zukünftig für alle SAPOS-Messungen entfällt. In Brasilien sind die PDGPS-Lösungen in das South American Datum 1969 (SAD 69) oder das jeweilige lokale Datum zu transformieren.

Damit besteht die Aufgabe, die PDGPS-Lösung in das Nutzersystem zu transformieren. Die Genauigkeit der mit den RTCM-Korrekturdaten übertragbaren Shift-Parameter reicht, wie in Kap. 3.5.5 erläutert,

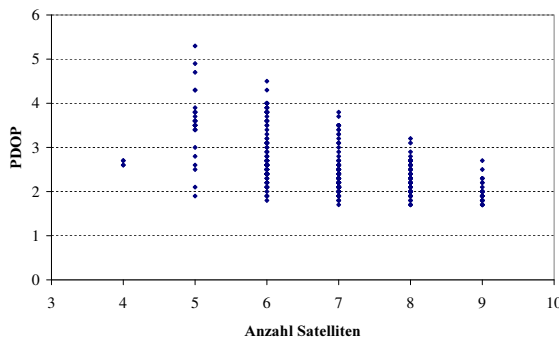


Abbildung 6.39: PDOP als Funktion der Anzahl verfügbarer Satelliten

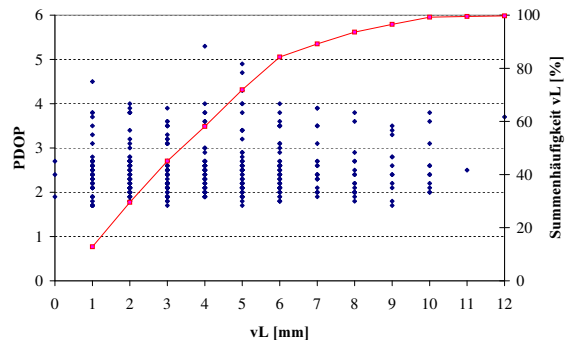


Abbildung 6.40: Die Abweichungen ( $v_L$ ) der als richtig akzeptierten Lösungen sind weitestgehend unabhängig vom PDOP-Wert

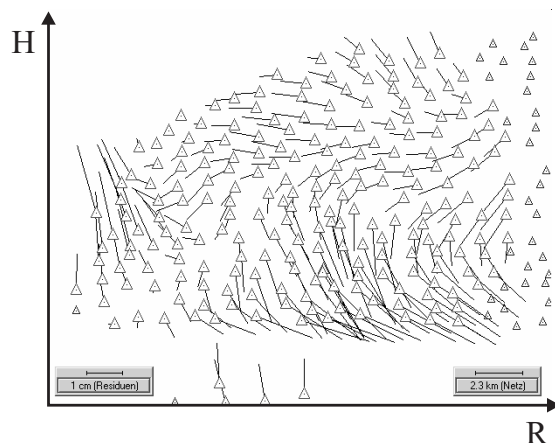


Abbildung 6.41: Signalanteil in den Transformationsresiduen

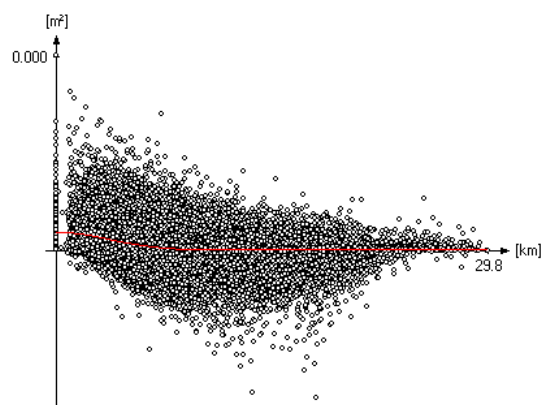


Abbildung 6.42: Kovarianzfunktion für die Residuen in der X-Komponente

allerdings nur zur Transformation von Codelösungen. Für die hochgenauen Trägerphasenlösungen benötigt der Anwender externe Informationen, um sich entweder durch eine 7-Parameter-Transformation lokal zwischen umliegenden identischen Punkten einzupassen oder er benötigt ein großflächigeres Transformationsmodell. Bei einer lokalen Einpassung wird zwar die Nachbarschaft am besten gewahrt, sie erfordert aber einen hohen Zeitaufwand, wenn der Anwender die Transformationspunkte, wie bei RTK-Messungen üblich, selbst besetzen muss. Alternativ können die Transformationsparameter im voraus aus den amtlichen Punktnachweisen berechnet werden, was immer noch einen hohen individuellen Rechenaufwand bedeutet und sich nur schlecht in die Roversoftware integrieren lässt. Außerdem sind so die unmittelbaren Nachbarschaftsbeziehungen nicht mehr sichergestellt.

Eine Alternative stellen flächenhafte Transformationsansätze dar, die für Regionen oder das ganze Landesgebiet gelten. Diese werden aus allen identischen Festpunkten abgeleitet, indem die im amtlichen Bezugssystem enthaltenen Systematiken durch beispielsweise Flächenpolynome, Ansätze nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) oder Kovarianzfunktionen modelliert werden. Im Prinzip handelt es sich um die gleiche Aufgabe wie die Repräsentation der entfernungsabhängigen Fehler in der Referenzstationsvernetzung.

Die flächenhaften Transformationsmodelle haben den Vorteil, dass sie in die Anwendersoftware integriert werden können, vergleichbar den Geoidmodellen für die Transformation von ellipsoidischen GPS-Höhen in physikalische Höhen des amtlichen Höhensystems. Ebenso können die Transformationsmodelle mit den RTCM-Korrekturdaten ausgesendet werden, wofür eine Arbeitsgruppe des RTCM-SC 104 gegenwärtig ein Standardformat entwickelt. Ein weitergehender Schritt ist, bereits die in das amtliche Bezugssystem transformierten Korrekturdaten auszustrahlen (Townsend, Jensen 2001). Über die Transformation in das jeweilige Bezugssystem hinaus sind dann noch die unterschiedlichen Abbildungen zu berücksichtigen, die in Deutschland ebenfalls ab 2006 auf das UTM-System vereinheitlicht werden sollen.

Um für Genauigkeitsuntersuchungen in der südniedersächsischen Referenzstationsmasche und für die Anwendungen in Brasilien Referenzkoordinaten sowohl im globalen als auch im amtlichen Bezugssystem berechnen zu können, wurde in der Diplomarbeit von Dilßner (1999) die windowsbasierte Transformationssoftware Xtra entwickelt. Realisiert wurde die flächenhafte Koordinatentransformation als Kollokationsansatz, womit das von Strinz (1925) beschriebene analoge Verfahren nun mit analytischen Mitteln umgesetzt werden konnte. Der LGN diente die Software zugleich zur Analyse der großräumigen systematischen Verzerrungen des amtlichen Bezugssystems. In einer reduzierten Version ist Xtra in die Roversoftware DCTools integriert, um Lösungen im ETRS 89 durch eine kleinräumige 7-Parameter-Transformation mit Restklaffenverteilung in das LS 100 zu transformieren.



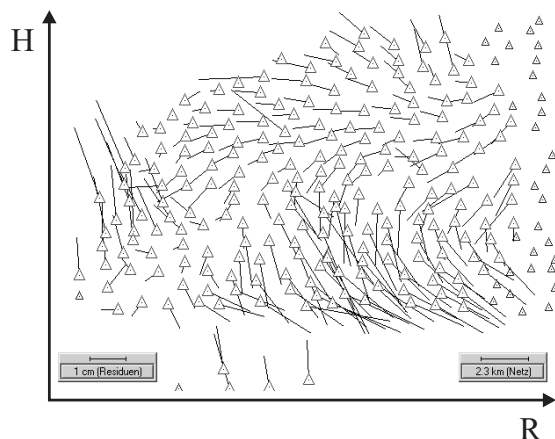


Abbildung 6.43: Residuen nach Koordinatentransformation von ETRS 89-Koordinaten in das amtliche Bezugssystem LS 100

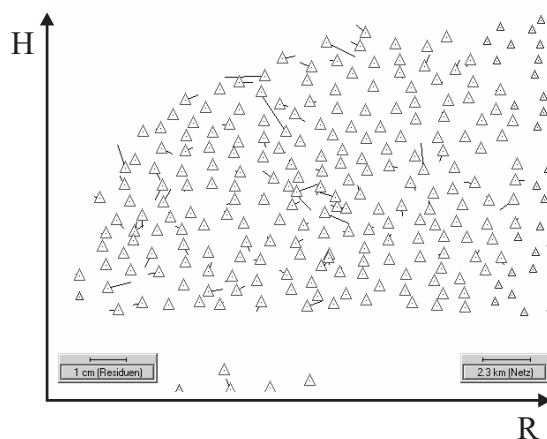


Abbildung 6.44: Verbleibendes Rauschen nach Modellierung des Signalanteils in den Transformationsresiduen durch Kollokation

Für den Transformationsansatz wurde die in Kap. 4.3.5 detaillierter erläuterte Kollokation nach der Methode der kleinsten Quadrate gewählt, weil die für hierarchische Punktfelder charakteristischen Restklaffungen noch auswertbare statistische Informationen enthalten, wie Abb. 6.41 zeigt. Vor Berechnung der Signalkovarianzfunktion (Abb. 6.42) ist eine Vortransformation notwendig, um den globalen Trend in Form des Datumsübergangs zwischen den Bezugssystemen abzuspalten. Die Filterung der Residuen (Abb. 6.43) und Prädiktion transformierter Punkte in das verzerrte Punktfeld erfolgt nach dem bekannten Kollokationsmodell. Abbildung 6.44 zeigt das nach Abzug des Signalanteils verbleibende Rauschen im Zielsystem.



## 7 Integration von GPS-Referenzstationsnetzen

### 7.1 Ausgangssituation

Das Grundkonzept zur Reduzierung entfernungsabhängiger Fehler hat sich bei den gegenwärtig im Aufbau befindlichen oder bereits operationellen Echtzeit-GPS-Referenzstationsnetzen gegenüber den ersten Entwürfen von 1996 nicht wesentlich verändert. Aus den auf den Referenzstationen berechneten skalaren Beobachtungskorrekturen werden mit Hilfe eines Interpolationsmodells Korrekturen für die Näherungsposition eines Nutzers abgeleitet. Innerhalb der durch die Kommunikationstechnik, Datenverarbeitung und internationalen Standards für Datenformate gesetzten Grenzen haben sich mit den Flächenkorrekturparametern (FKP) und der Virtuellen Referenzstation (VRS) zwei Verfahren in der Praxis durchgesetzt, die sich in der Repräsentation der Vernetzungsparameter unterscheiden. Beide stellen jedoch im Endergebnis Beobachtungsraumkorrekturen bereit und ermöglichen die präzise Echtzeitpositionierung relativ zu den umliegenden Referenzstationen.

In der Entwicklungsphase setzten sich Referenznetze aus einzelnen Referenzstationsmaschen mit 3–4 Stationen zusammen, die Referenznetze wurden unabhängig voneinander betrieben. Während in anderen Ländern unabhängige regionale Netze mit wenigen Stationen und einer Ausdehnung von weniger als 200 km aufgebaut werden, betreiben die Landesvermessungen in Deutschland über 250 aktive Referenzstationen und haben in jedem Bundesland eine flächendeckende Vernetzung realisiert. Alleine Niedersachsen ist mit 44 zu vernetzenden Referenzstationen ausgestattet, einschließlich drei Bremer Stationen, zusätzlich werden Referenzstationen benachbarter Länder einbezogen.

Aufgrund der großen Anzahl an Stationen und des räumlichen Zusammenwachsens unabhängiger Netze ist zu prüfen, ob das eingangs vorgestellte Grundkonzept für PDGPS-Netze der 1. Generation weiterhin anwendbar ist. Derzeit stellt die simultane Verarbeitung von etwa zwei Dutzend Referenzstationen in einer Multistationslösung eine rechentechnische Grenze für die Vernetzung dar. Die Grenze ergibt sich aus der für die Mehrdeutigkeitslösungen im Referenznetz noch akzeptierbaren Rechenzeit, die mit der Anzahl der zu verarbeitenden Stationen und damit auch der Anzahl der Unbekannten überproportional wächst. Deshalb werden in Niedersachsen für drei sich überlappende Teilnetze (West, Nord-Ost, Süd-Ost) zusammen mit den kooperierenden Stationen der Nachbarländer getrennte Vernetzungslösungen berechnet.

Da die modelltheoretisch optimale Lösung einer homogenen Auswertung in einem Guss nicht realisierbar ist, haben Wübbena et al. (2001) die optimale Aufteilung der Ländernetze untersucht. Die Aufteilung in unabhängige oder sich überlappende Subnetze hat den Vorteil der Skalierbarkeit, d.h. die Größe der Teilnetze wird abhängig von der Rechenkapazität gewählt, die Größe des Gesamtnetzes ist aber nahezu unbegrenzt. Dagegen erschwert die Subnetzbildung die Modellierung der großräumigen entfernungsabhängigen Fehler und an den Übergängen der Teilnetze sind Diskontinuitäten nicht auszuschließen.

Bei einer hierarchischen Aufteilung des Gesamtnetzes, bei der einige über das Gesamtgebiet verteilte Stationen gemeinsam mit jedem Subnetz ausgewertet werden, lassen sich die großräumigen entfernungsabhängigen Fehler besser von den kleinräumigen Fehlern trennen und die Homogenität im Gesamtnetz bleibt gewahrt. Zu den weiteren Vorteilen dieses Ansatzes gehört die Möglichkeit eines unabhängigen Monitorings durch Referenzstationen aus den benachbarten Teilnetzen. Weiterhin kann die hierarchische Auswertung Ausfälle in den Teilnetzen kompensieren, indem zumindest Korrekturterme der großräumigen Fehler für dieses Teilnetz berechnet werden. Die Grenze dieses hierarchischen Konzeptes ergibt sich allerdings aus den maximalen Stationsentfernungen, über die Mehrdeutigkeiten noch in Echtzeit gelöst werden können.

## 7.2 Zustandsraummodellierung

Mit dem bisherigen Vernetzungskonzept ist weder eine horizontale noch eine vertikale Integration der verschiedenen Referenzstationsnetze vorgesehen. D.h. die Netze der Bundesländer bzw. deren Teilnetze bleiben parallel nebeneinander arbeitende Insellösungen. Ebenso wenig werden die Referenzstationsbeobachtungen höherer Netzhierarchien, beispielsweise des GREF auf Bundesebene, des Europäischen Permanentstationsnetzes (EPN) oder des globalen IGS-Netzes systematisch in die Echtzeit-Multistationslösung einbezogen. Eine Ausnahme ist die Nutzung der IGS-Ephemeridenprodukte und der GREF-Stationen, die gleichzeitig SAPOS-Stationen sind.

Um die Vorteile aus der hohen Anzahl an Referenzstationen und der großen Netzausdehnung nutzen zu können, ist eine Weiterentwicklung des Vernetzungskonzeptes notwendig. Als mathematische Grundlage dieser Weiterentwicklung empfiehlt sich die Zustandsraummodellierung aller Fehlereinflüsse der GPS-Beobachtungsgleichung. Die Zustandsmodellierung ist Kern der Wide Area DGPS-Algorithmen und ist im Prinzip auch Grundlage der PPP-Ansätze. In anderen Bereichen der Geodäsie wie beispielsweise der Deformationsanalyse (Heunecke et al. 1993) weist die Zustandsmodellierung ebenfalls deutliche Vorteile gegenüber nichtparametrischen Ansätzen auf und wurde deshalb auch für die Verknüpfung geodynamischer GPS-Beobachtungen mit geophysikalischen FEM-Modellen in Deformationsnetzen im Süden Islands vorgeschlagen (Alex, Willgalis 1996).

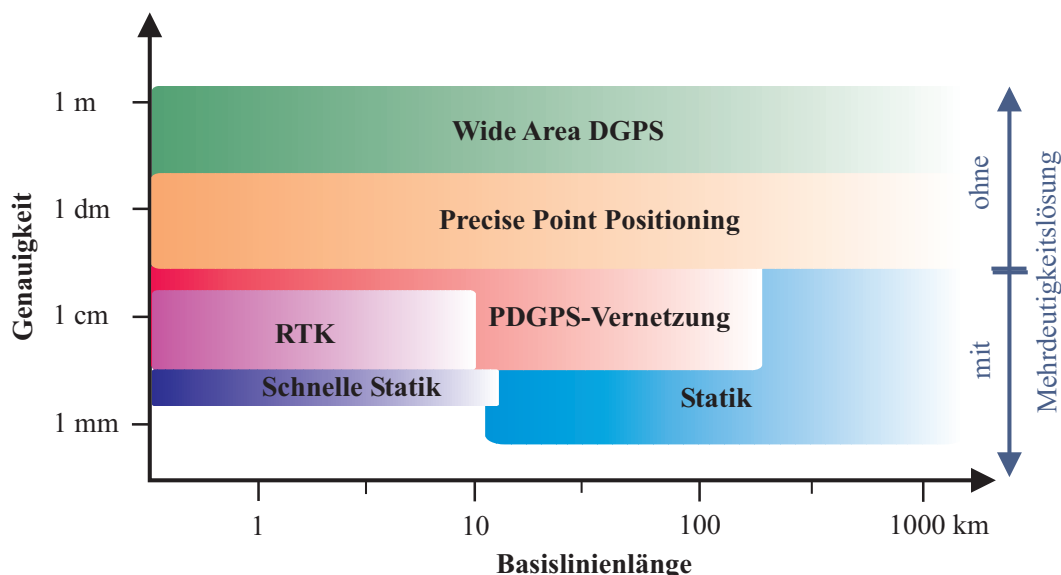


Abbildung 7.1: Entfernungsbereich und Genauigkeitspotential verschiedener GPS-Positionierungsverfahren

In den kontinentalen Wide Area DGPS-Netzen ist für die Codebeobachtungen keine Mehrdeutigkeitslösung notwendig, und für die globalen Echtzeit-PPP-Lösungen wird auf die Mehrdeutigkeitslösung verzichtet (Abb. 7.1). Die erreichbare Genauigkeit ist auf den Meter- bzw. Dezimeterbereich beschränkt, dafür aber kontinental bis global verfügbar. Ohne Mehrdeutigkeitslösung ist die Zustandschätzung der GPS-Fehler trotz der großen Stationsabstände und der geringen Anzahl an Referenzstationen erheblich vereinfacht. Eine andere Situation ergibt sich für die trägerphasenbasierten Echtzeit-Multistationslösungen in PDGPS-Netzen. Um die Zentimetergenauigkeit in einer räumlich begrenzten Region zu gewährleisten, müssen die Mehrdeutigkeiten für ein Zustandsraummodell erwartungstreu geschätzt werden. Gerade dabei unterstützt aber die hohe Redundanz in den Referenzstationsbeobachtungen in Verbindung mit einer möglichst großen Netzausdehnung die Separation der Fehlereinflüsse, was wiederum die erwartungstreuere Mehrdeutigkeitslösung begünstigt.

Im Zustandsraumansatz werden aus den Referenzstationsbeobachtungen in einem Kalman-Filter Vektoren der Fehlerkomponenten geschätzt. Diese Fehlervektoren werden an die Nutzer übertragen, die daraus für ihren Standort unmittelbar Korrekturen berechnen. Damit ist eine genauere und zuverlässigere Prädiktion der ortsabhängigen Fehler möglich als mit den Interpolationsmodellen. Mit den Vektoren können auch Kovarianzinformationen übertragen werden, die eine Genauigkeitsbeurteilung der Korrekturen und damit eine Abschätzung der Qualität der Positionsbestimmung erlauben, was bislang nicht möglich war.

Zustandsparameter sind grundsätzlich alle Fehlerterme der Beobachtungsgleichung, wobei den globalen und regionalen Termen die größte Bedeutung zukommt. Entscheidend ist die Trennbarkeit verschiedener Zustandsparameter, insbesondere der Uhrfehler und Hardwareverzögerungen, als Voraussetzung für die erwartungstreue Mehrdeutigkeitslösung. Die Schwierigkeit besteht darin, alle wesentlichen Fehlereinflüsse zu modellieren und nach ihrer Ursache richtig zuzuordnen, wie Wübbena (2001) am Beispiel der absoluten Phasenzentrumsvariationen für Empfänger- und Satellitenantennen erläutert. Anstatt die systematischen Fehler als Störparameter frühzeitig aus der GPS-Auswertung zu eliminieren, liefern sie im Zustandsmodell zusätzliche Informationen wie beispielsweise TEC-Modelle der regionalen Ionosphäre oder eine Wasserdampfverteilung für Wettermodelle. Es ist grundsätzlich auch möglich, Koordinatenänderungen von Referenzstationen zu detektieren und Referenzstationsnetze damit zum geodynamischen Monitoring einzusetzen.

Während es im GPS-Postprocessing üblich ist, zusätzlich zu den eigenen Beobachtungen präzise Ephemeriden und Satellitenuhrparameter des IGS einzubinden und damit Zustandsrauminformationen aus einem externen Netz zu verwenden, gelingt dies für die Echtzeitpositionierung noch nicht. Dies liegt u.a. daran, dass die entsprechenden prädierten IGS-Produkte nicht genau genug waren, die rechtzeitige Bereitstellung der externen Zustandsparameter ein Problem darstellte und es keine standardisierten Datenformate für diese Zwecke gibt. Dass aber eine Standardisierung möglich ist, zeigen gerade die IERS- und IGS-Konventionen. Für die Echtzeitpositionierung müssen sie erweitert werden bis hin zur Festlegung eines Troposphärenmodells. Nur die Standardisierung der Zustandsraummodelle gewährleistet, dass die von einem Referenzdienst bereitgestellten Zustandsvektoren auch von jedem Nutzer verarbeitet werden können.

Wie die Entwicklung des RTCM SC-104 Formates zeigt, ist die Standardisierung von Datenformaten ein sehr langwieriger Prozess und die Standardisierung von Auswertelgorithmen noch ungleich schwieriger. PDGPS-Netze der 2. Generation arbeiten deshalb intern zumindest mit vereinfachten Zustandsraummodellen, die Repräsentation der Korrekturdaten erfolgt aber im Beobachtungsraum nach dem bisherigen Grundkonzept, wie an den Beispielen von Wübbena (2002) deutlich wird. Erst mit den PDGPS-Netzen der 3. Generation wird eine echte Zustandsschätzung in integrierten hierarchischen oder kooperativen Netzen erfolgen und der Zustandsvektor selbst den Anwendern verfügbar gemacht. Erste Details solcher Zustandsvektoren mit den Möglichkeiten zu deren internetbasierter Verteilung zeigt Wübbena (2003). In Abb. 7.2 ist exemplarisch ein zweistufiges hierarchisches Netz dargestellt, Abb. 7.3 zeigt drei kooperierende Teilnetze mit minimaler Überlappung an den Blockgrenzen.

Mit der Nutzung von Zustandsinformationen auf Anwenderseite entwickelt sich die differentielle, auf eine oder mehrere umgebende Referenzstationen bezogene Positionsbestimmung zu einer präzisen absoluten Punktbestimmung. Dies ist dem PPP vergleichbar, erfolgt aber in Echtzeit und mit Mehrdeutigkeitslösung. Diese Form des RTK-PPP entwickelt sich zu einem neuen Forschungsschwerpunkt insbesondere an der University of Calgary (Abdel-Salam, Gao 2003). Andererseits wird das Echtzeit-PPP ohne Mehrdeutigkeitslösung vermehrt für die geometrische Bahnbestimmung von LEOs eingesetzt; vgl. IAG Arbeitsgruppe 4.5.2 „Carrier Phase based Precise Point Positioning“ sowie Bisnath, Langley (2002).

Ein weiterer abschließender Entwicklungsschritt ist denkbar, in dem die Zustandsinformationen aus den unterschiedlichen PDGPS-Netzen in die Broadcast Message einfließen und mit den Messsignalen der Navigationssatelliten ausgestrahlt werden. Dies kann in Form direkter Verbesserungen an den Parametern der Broadcast Message erfolgen oder in Form von Korrekturen. Dabei können Parameter mit nur

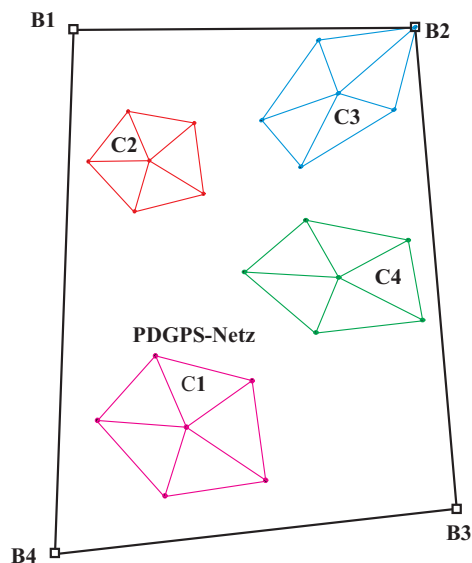


Abbildung 7.2: Integration hierarchischer PDGPS-Netze auf nationaler (C) und regionaler (D) Ebene

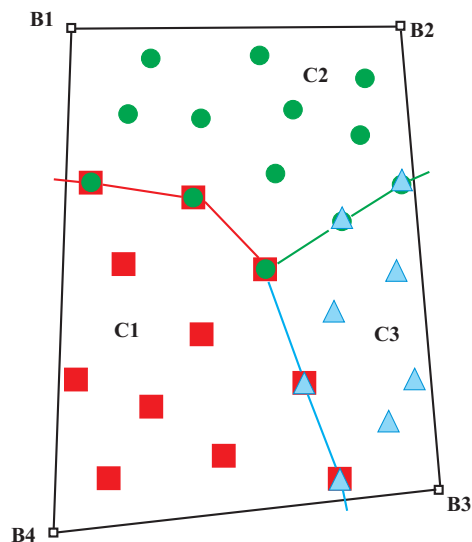


Abbildung 7.3: Verknüpfung benachbarter PDGPS-Teilnetze

regionaler Gültigkeit einbezogen werden. Für die Nutzer haben diese Netze der 4. Generation den Vorteil, dass sie keine zusätzlichen Kommunikationsverbindungen und Dienste für die präzise Echtzeitpositionierung benötigen. Sie führen dann ihre präzise absolute Echtzeitpositionierung so unabhängig vom Referenznetzsegment durch, wie sie es bereits vom Kontrollsegment sind.

Die auf Zustandsmodellierung basierende Referenzstationsvernetzung ist zunächst einmal die Grundlage, um Beobachtungen und Zustandsinformationen horizontal zwischen kooperierenden Netzen und vertikal zwischen unterschiedlichen hierarchischen Netzebenen auszutauschen. Die durch eine größere Anzahl an Referenzstationen gegebene Redundanz ermöglicht zum einen die Filterung der stationsabhängigen Fehler, insbesondere der Mehrwegeausbreitung, aus den Referenzstationsbeobachtungen. Zum anderen lässt sich mit der Vergrößerung der Referenzstationsabstände eine Optimierung der Referenzstationsverteilung erreichen. Eine große Netzausdehnung ist anzustreben, weil sie durch eine größere Dekorrelation eine bessere Trennung der großräumigen Zustandsparameter erlaubt. Inwieweit der Ausdünnung der Stationsdichte durch die Korrelationslänge der kleinräumigen Fehler, insbesondere der ionosphärischen Störungen, eine Grenze gesetzt ist, ist noch zu untersuchen.

Zustandsvektoren können im Broadcast-Verfahren übertragen werden. Durch eine zeitlich variable Ausstrahlung der einzelnen Zustandsparameter werden die Bandbreitenanforderungen an die Kommunikationsmedien gesenkt. Bei der paketorientierten Verteilung per Internet oder Mobilfunk ist dies jedoch nur dann wirklich notwendig, wenn zukünftig mit den Korrekturdaten viele zusätzliche Informationen des Dienstbetreibers (u.a. Transformationsparameter, Geoidmodell, kartographische Daten) gemeinsam ausgestrahlt werden. Abschließend ist die Zustandsraummodellierung eine wichtige Grundlage für die effektive Integration weiterer Satellitennavigationsdienste wie GLONASS, GALILEO und weiterer möglicher Dienste in GNSS-Referenznetze (Kap. 8).

### 7.3 Hierarchisches Referenznetzkonzept für Brasilien

Der Bedarf für präzise GPS-Echtzeitvernetzung und die Möglichkeiten zur Einrichtung von Referenzstationsdiensten unterscheiden sich in einem Flächenland wie Brasilien grundsätzlich von denen Deutschlands. Eine landesweit flächendeckende Vernetzung ist aus finanziellen Gründen ausgeschlossen. Vielmehr konzentriert sich die Nachfrage für die präzisen Echtzeitlösungen auf wenige dicht besiedelte, wirtschaftlich starke Regionen, die räumlich weit auseinander liegen. Dort werden zentimetergenaue Echtzeitlösungen für Landes- und Liegenschaftsvermessungen, für ingenieurgeodätische Aufgaben und für die Navigation nachgefragt. Für die restliche Landesfläche wird zwar auch die Echtzeitpositionierung favorisiert, der Genauigkeitsbereich beschränkt sich aber auf den Dezimeter- bis Meterbereich.

Die verfügbare Infrastruktur für die Echtzeitpositionierung besteht aus den IGS-Stationen Südamerikas und dem RBMC-Netz in Brasilien (vgl. Abb. 6.21). Zusätzlich könnten lokale und regionale PDGPS-Netze nach dem Prinzip der beiden vorgestellten Testnetze eingerichtet werden. Bezüglich der Kommunikation gibt es keine unmittelbar nutzbare Infrastruktur, wengleich es eine Reihe von Datenfunknetzen gibt und seit 2004 auch mit dem Mobilfunk grundsätzlich Daten übertragen werden können. Die Datenkommunikation sollte sich deshalb von Beginn an auf die IP-basierte Übertragungstechnik stützen.

Ein Echtzeit-PPP ließe sich bereits mit den vorhandenen IGS- und RBMC-Stationen realisieren, wenn die Beobachtungen der RBMC-Stationen in Echtzeit einer Vernetzungszentrale zugeführt würden. Dazu müssten alle Stationen direkt an das Internet angeschlossen und der Datenabruf mittels einer Kommunikationssoftware automatisiert werden, was noch nicht realisiert ist. Die landesweite Verfügbarkeit und der Genauigkeitsbereich von 1–2 dm machen das Verfahren für viele Anwendungen interessant. Die Mehrheit der Nutzer, die nur über GPS-Einfrequenzempfänger verfügt, blieben jedoch von einem RT-PPP-Dienst ausgeschlossen.

Für die höheren Genauigkeitsanforderungen in den räumlich begrenzten Gebieten wird der Aufbau kleiner regionaler Netze mit den in der Arbeit beschriebenen Netzarchitekturen empfohlen. Auf der Basis der Zustandsraummodellierung sind diese Netze in das übergeordnete RBMC-Netz und das IGS-Netz einzubinden. Bei einer Verdichtung des RBMC um ca. 10 Stationen ließe sich mit rund 250 km Stationsabstand ein weitmaschiges Netz, ein sogenanntes Wide Area oder Sparse Network, schaffen, in dem bei vollständiger Zustandsmodellierung die erwartungstreue absolute Mehrdeutigkeitslösung gelingt. Mehrdeutigkeitsinformationen können dann ebenso wie einzelne Zustandsparameter mit den regionalen Netzen ausgetauscht werden. Ziel dabei ist, die Mehrdeutigkeitslösung aufgehender Satelliten in diesen regionalen Netzen zu beschleunigen und damit die Anzahl der verfügbaren Satelliten für die präzise Positionsbestimmung zu erhöhen. Bis zur Einführung standardisierter Auswertemodelle für die Zustandsraummodellierung kann ein solches hierarchisch angelegtes Netzkonzept als PDGPS-Netz der 2. Generation betrieben werden, das allen Nutzern die RTCM SC-104 konformen Beobachtungskorrekturen zur Verfügung stellt.





## 8 Integration von GNSS in Referenzstationsnetze

### 8.1 Einleitung

In der Mehrzahl der Referenzstationsnetze werden ausschließlich GPS-Empfänger verwendet. Ausnahmen stellen z.B. das Permanentstationsnetz GREF des BKG dar, die Referenzstationsnetze der Energieversorgungsunternehmen im Burgenland, in Kärnten und in Wien oder das Netz ascos der Ruhrgas AG, die kombinierte GPS/GLONASS-Empfänger einsetzen. Die Nutzung zweier unabhängiger Satellitennavigationssysteme verspricht eine höhere Redundanz und damit eine höhere Zuverlässigkeit, die beiden Systeme sollen sich gegenseitig kontrollieren. Aus der verdoppelten Satellitenanzahl soll eine verbesserte Satellitensichtbarkeit auch in ungünstigen Messumgebungen folgen. Beide Ziele werden jedoch nur bedingt erreicht, da das GLONASS-Raumsegment durch die kurze Lebensdauer und häufigen Ausfälle der Satelliten nicht voll funktionsfähig ist.

Die laufenden Planungen zum Aufbau des europäischen Navigationssystems GALILEO begründen eine neue Motivation zur Einrichtung von GNSS-Referenzstationsnetzen, d.h. zur Ausrüstung von Referenzstationen mit Empfängern, die sowohl GPS und GLONASS als auch GALILEO-Beobachtungen empfangen können. Die GALILEO-Signalstruktur wird durch günstigere Linearkombinationen schnellere Mehrdeutigkeitslösungen ermöglichen, als sie bislang mit GPS möglich sind. In dem Zusammenhang ist auch die Modernisierung des GPS zu beachten, die für die präzise Echtzeitpositionierung eine Reihe von Vorteilen bringen wird.

Die wesentlichen bisherigen Entwicklungsschritte der drei globalen Satellitennavigationssysteme GPS, GLONASS und GALILEO sind in Tab. 8.1 aufgeführt. Ziel der drei nachfolgenden Abschnitte ist es, die zukünftige Entwicklung der Satellitennavigationssysteme und ihre mögliche Nutzung in Bezug auf die präzise Echtzeitpositionierung in Referenzstationsnetzen aufzuzeigen. Diese Schlussfolgerungen basieren sowohl auf theoretischen Überlegungen als auch auf empirischen Ergebnissen mit kombinierten GPS/GLONASS-Beobachtungen.

### 8.2 GPS-Modernisierung

Seit dem Start des ersten Block II Satelliten vor nunmehr 25 Jahren arbeitet das GPS-System konzeptionell unverändert. Die Satelliten werden nach Bedarf ersetzt, wobei verschiedene Generationen zum Einsatz kommen. Mitte der neunziger Jahre führten Forderungen der Nutzer nach einer höheren Genauigkeit und Integrität des Systems zur Accuracy Improvement Initiative (AII). Deren Maßnahmen verbessern das GPS-System in einzelnen Komponenten, ohne das Grundkonzept zu verändern. Erst mit der Ende der neunziger Jahre angekündigten Modernisierungsinitiative stehen grundlegende Erweiterungen der Signalstruktur bevor, die in Zukunft erhebliche Verbesserungen für präzise Echtzeitpositionierungen erwarten lassen. Die Ergebnisse dieser Initiative werden jedoch erst langfristig, nach 2010, operationell nutzbar sein. Eine den Zielen der Modernisierungsmaßnahmen entsprechende Entscheidung von erheblicher Bedeutung für viele Nutzer war die permanente Deaktivierung der Selective Availability ab dem 2. Mai 2000.

Parallel zum GPS-Modernisierungsprogramm werden weltweit Anstrengungen unternommen, GPS durch zusätzliche Boden- und Weltrauminfrastruktur zu ergänzen. Zu den satellitenbasierten Augmentationssystemen (SBAS) zählen das von der U.S. amerikanischen Luftfahrtbehörde (FAA) initiierte Wide Area Augmentation System (WAAS), der von der Europäischen Weltraumagentur ESA aufgebaute European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) sowie der japanische Multi-functional

Tabelle 8.1: Entwicklungsschritte der globalen Satellitennavigationssysteme

1973	Start des offiziellen GPS-Entwicklungsprogramms durch das DoD
22.02.1978	Start des ersten GPS Block I Satelliten
12.10.1982	Start des ersten GLONASS-Satelliten
14.02.1989	Start des ersten GPS Block II Satelliten
23.03.1990	Einführung der Selective Availability (SA)
24.09.1993	GLONASS FOC per Verordnung des Präsidenten der Russischen Föderation
31.01.1994	Permanente Aktivierung des Anti-Spoofing (A-S)
19.12.1994	EU-Ministerrat beauftragt EU-Kommission mit der Entwicklung eines europäischen Satellitennavigationssystems (GNSS-1 und GNSS-2)
17.07.1995	GPS erreicht Full Operational Capability (FOC)
18.01.1996	GLONASS Raumsegment mit 24 SV ausgebaut
28.03.1996	Presidential Decision Directive (PDD): Freigabe der GPS-Signale für die kostenfreie weltweite zivile Nutzung
23.07.1997	Start des ersten GPS Block IIR Satelliten
15.01.1999	USA kündigt Implementierung eines zweiten und dritten zivilen GPS-Signals an
18.06.1999	EU-Verkehrsministerrat beschließt Beginn der GALILEO-Definitionsphase
02.05.2000	SA permanent deaktiviert
26.03.2002	EU-Verkehrsministerrat leitet GALILEO-Entwicklungsphase ein
24.09.2002	Detaillierte Beschreibung der GALILEO-Dienste im „High-Level Definition Dokument“ veröffentlicht (EC 2002)
10.06.2004	Gründung des Gemeinsamen Unternehmens GALILEO (GJU) durch EC und ESA
26.06.2004	EU-US Vereinbarung zur vollen Interoperabilität der GALILEO-Signalstruktur
28.06.2004	Russland kündigt Austausch des GLONASS-Raumsegmentes innerhalb von 10 Jahren an
10.12.2004	Europäischer Rat bestätigt Finanzierung für die GALILEO-Errichtungs- und Betriebsphase

Satellite-based Augmentation Service (MSAS) des zivilen Luftfahrtbüros. Das WAAS hat 2003 die Initial Operational Capability (IOC) erreicht, EGNOS wird 2006 in den operationellen Betrieb übergehen.

Die seit 1989 gestarteten Block II bzw. Block IIa Satelliten, die die Grundlage des 1995 erstmals voll ausgebauten GPS-Raumsegmentes bilden, haben mit über 10 Jahren ihre geplante Lebensdauer von sechs Jahren weit überschritten. Durch Ausfälle entstehende Lücken in der Satellitenkonstellation werden gegenwärtig durch Satelliten vom Typ Block IIR (Replenishment) aufgefüllt. Deren Nachfolgeneration Block IIF (Follow-on) wird bereits gebaut und voraussichtlich ab 2006 gestartet. Die geplante fünfte Generation der Block III Satelliten wird nicht vor 2012 im Orbit plaziert, sie soll das GPS-System bis wenigstens 2030 aufrecht erhalten.

Die Accuracy Improvement Initiative (AII) wurde durch das GPS Joint Program Office (JPO) eingeleitet, nachdem 1995 in zwei Studien durch die National Academy of Public Administration (The Global Positioning System - Charting the Future) und des National Research Council (The Global Positioning System - A Shared National Asset) die Verbesserung der Genauigkeit und der Integrität der GPS-Signale, der Qualität der in der Navigation Message enthaltenen Uhr- und Ephemeridenparameter sowie eine Erneuerung des Kontrollsegmentes empfohlen wurde.

Im einzelnen wurden für die Monitorstationen 1994 neue, aus dem ITRF 91 abgeleitete Koordinaten [WGS 84 / G730] eingeführt. Damit wurde die Genauigkeit des WGS 84 vom Meterbereich auf bis zu 10 cm verbessert. Eine weitere Genauigkeitssteigerung auf unter 5 cm erfolgte 1997 durch Anpassung

an die ITRF 94 Lösung. Diese als WGS 84 / G 873 (29.06.1996) bezeichnete Lösung ist gegenwärtig Grundlage der Broadcast Ephemeriden. Bereits 1994 war die Gravitationskonstante (GM) des IERS-Standards von 1992 eingeführt worden. Hinzu kamen 1996 das Schwerefeldmodell EGM96 bis Grad und Ordnung 360 und ein globales Geoidmodell mit einer Genauigkeit von 0,5-1 m (Müller et al. 1997).

Um die Bestimmung der Broadcast Ephemeriden auf Submetergenauigkeit zu verbessern und den Extrapolationszeitraum zu verringern, werden wegen der besseren weltweiten Stationsverteilung Beobachtungen von 11 Stationen der National Geospatial Intelligence Agency (NGA), seit 2004 Nachfolgerin der National Imagery and Mapping Agency (NIMA), als zusätzliche Monitorstationen eingebunden. Damit ist die ständige Sichtbarkeit aller Satelliten für das Kontrollsegment als Voraussetzung für eine erhöhte Integrität der Signale gewährleistet. Durch diese Maßnahmen wird der Signal-in-Space-Range-Error (SISRE) auf 1,30 m verbessert (Hay 2000), was Absolutpositionierungsgenauigkeiten von 3 m ermöglicht. Darüber hinaus wird das Boden- und Kontrollsegment erneuert, um die kommende Generation der Block IIF Satelliten einfacher und wirtschaftlicher steuern zu können. Die verschiedenen Maßnahmen der Accuracy Improvement Initiative sollen 2005 abgeschlossen werden.

Weitergehende zivile und militärische Anforderungen an die GPS-Nutzung mündeten in der GPS-Modernisierungsinitiative. Nur durch eine neue Signalstruktur lassen sich die hohen Anforderungen der zivilen U.S. amerikanischen Nutzer, bei gleichzeitiger Sicherstellung des ursprünglichen militärischen Auftrages des GPS, erfüllen. Hinzu kam die Notwendigkeit, marktpolitisch auf die in Europa durch GALILEO entstehende Konkurrenz reagieren zu müssen. Nachdem bereits 1996 in der Presidential Decision Directive (PDD) die beiden Trägerfrequenzen L1 und L2 für den zivilen Gebrauch freigegeben wurden, folgte 1998 die Ankündigung, eine zweite zivile Frequenz einzuführen (Gore 1998). Kurz darauf wurde auch die Einführung einer dritten Trägerfrequenz bekannt gegeben (Gore 1999). Das Ziel des mehr als fünfzehnjährigen Modernisierungsprogramms ist, die Positionierungs- und Zeitbestimmungsgenauigkeit sowie die Verfügbarkeit und Integrität der GPS-Signale zu verbessern, um allen Nutzern ein robustes und verlässliches Navigationssystem zur Verfügung zu stellen.

Die GPS-Modernisierungsinitiative sieht vor, für zivile Nutzungen einen zweiten zivilen Code (L2C) auf L2 sowie ein drittes ziviles Signal auf der neuen Frequenz L5 im ARNS-Band mit 1176,45 MHz einzuführen (vgl. Tab. 8.9). Der L2C-Code soll den Zugriff auf die volle L2-Wellenlänge ermöglichen. Er soll eine wesentlich bessere Qualität als der C/A-Code auf L1 haben, so dass der Empfang auch in ungünstigen Empfangssituationen wie beispielsweise in Gebäuden möglich sein soll. Das Code-Rauschen wird auf unter 1 m reduziert. Aus den zwei zivilen Codes auf L1 und auf L2 lassen sich Korrekturen für den ionosphärischen Laufzeitfehler berechnen. Damit wird Nutzern eine absolute Positionierungsgenauigkeit in der Lage von rund 4 m ermöglicht. Die dritte Trägerfrequenz wird, im Gegensatz zu L2, das durch Radar gestört werden kann, vor Interferenzen besser geschützt sein und die Anforderungen für die Luftfahrtnavigation, insbesondere Präzisionslandungen, erfüllen. Sie wird geodätische Echtzeitpositionierungen ermöglichen, in denen Mehrdeutigkeiten möglicherweise bereits mit nur einer Epoche für Basislinien über 40 km gelöst werden können. Ein neuer militärischer M-Code wird auf den beiden Trägerphasen L1 und L2 um den C/A-Code herum gruppiert, aber spektral getrennt sein. Mit der größeren Spreizung im Frequenzspektrum wird er unanfälliger gegen Signalstörungen.

Erste Tests mit dem L2C-Signal und dem militärischen M-Code beginnen mit der aufgerüsteten Bauserie der Block IIR-M-Satelliten (ab IIR-14/M-1), deren erster Start für das Frühjahr 2005 geplant ist. Bis zu acht Stück dieser IIR-M sollen gestartet werden. Der L2C-Code wird die Initial Operational Capability (IOC) ca. 2008 erhalten, wenn sich 18 entsprechend ausgerüstete Satelliten im Orbit befinden. Mit 24 Satelliten soll dann 2010 die Full Operational Capability folgen. Mit den ersten Block IIF-Satelliten, deren Start ab 2006 geplant ist, wird zusätzlich die dritte Trägerfrequenz L5 verfügbar sein. L5 soll die IOC 2012 und die FOC 2014 erhalten (FRP 2001, S. 3-3). Mit den Block III-Satelliten, die frühestens ab 2012 gestartet werden (McDonald 2002), wird die GPS-Modernisierung abgeschlossen.

Um die Vorteile der neuen Signalstruktur ausnutzen zu können, ist die Aufrüstung oder Neubeschaffung von Empfängern frühestens ab 2008 (L2C) bzw. 2012 (L5) empfehlenswert. Ab 2008 sollten auch bereits geodätisch präzise, kombinierte GPS/GALILEO-Empfänger verfügbar sein. Vorhandene Empfänger können jedoch auch über dieses Datum hinaus genutzt werden, da nach dem U.S. Federal Radionavigation Plan (FRP 2001) die Kompatibilität zur bisherigen Signalstruktur gewahrt bleibt.

### 8.3 GLONASS

GLONASS ist das zweite, in der früheren Sowjetunion entwickelte globale Satellitennavigationssystem. Konzeptionell ist es dem GPS-System sehr ähnlich, es unterscheidet sich aber in einigen Systemparametern wie dem Raumsegment oder der Signalstruktur deutlich (Tab. 8.2). Die aus den Unterschieden resultierenden Vor- und Nachteile werden im nachfolgenden Abschnitt beschrieben. Das militärische, aber ohne Einschränkungen durch Systemsicherungsmaßnahmen arbeitende System bietet grundsätzliche Vorteile in der kombinierten Nutzung mit GPS. Die Anfang der neunziger Jahre eingeleitete Öffnung des ehemaligen Ostblocks zum Westen hin weckte Hoffnungen auf eine intensive Zusammenarbeit bei GNSS-Anwendungen, die durch den verzögerten Aufbau des GLONASS-Systems und den anschließenden schnellen Verfall nicht erfüllt wurden. Aus den Untersuchungen zur Kombination von GPS und GLONASS lassen sich dennoch für die Kombination von GPS mit GALILEO nützliche theoretische und empirische Erkenntnisse ziehen. Abschnitt 8.3.4 gibt dazu Untersuchungsergebnisse wieder, die mit zwei RTK-GPS/GLONASS-Systemen gewonnen wurden. Die Untersuchungen erfolgten im Vorfeld der Planungen des Landesbetriebes Geoinformation und Vermessung (LGV) Hamburg, um zu klären, ob die Ausstattung der vier Hamburger Referenzstationen Vorteile für den SAPOS-Dienst hat.

#### 8.3.1 GLONASS-Systementwicklung

GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) ist das seit 1972 zeitgleich mit dem GPS-System entwickelte Radionavigationssystem der früheren UdSSR. Der erste GLONASS-Satellit konnte erst am 12. Oktober 1982 gestartet werden, fünf Jahre nach dem ersten GPS-Satelliten. Am 24.9.1993 wurde das System mit zunächst 12 Satelliten offiziell in Betrieb genommen, aber erst am 18.1.1996 war das Raumsegment mit 24 Satelliten vollständig ausgebaut. Die 24er Konstellation hielt nur 40 Tage, danach reduzierte sich das Raumsegment bis zum Juli 1998 sukzessive auf vierzehn aktive Satelliten. Trotz des Starts von jeweils drei Satelliten im Jahr 1998 und von 2000 an jährlich sind aufgrund der kurzen Lebensdauer von nur drei Jahren und zahlreicher Ausfälle gegenwärtig nur elf Satelliten nutzbar (Mai 2005). Unter den im Dezember 2003 bzw. Dezember 2004 gestarteten Satelliten befinden sich zwei der neueren Bauserie GLONASS-M (Modified), deren geplante Lebensdauer auf 5–7 Jahre ausgelegt ist.

Im November 2002 wurde in einer Mitteilung des Coordinational Scientific Information Center of Russian Space Forces (CSIC) die Erneuerung des Systems angekündigt. Durch vertragliche Vereinbarungen mit anderen Ländern soll der Aufbau des Systems unterstützt werden. So wird z.B. Indien die Entwicklung und den Bau von Satelliten unterstützen und auch an der Produktion von Empfängern beteiligt sein (The Moscow Times, 30.01.2004). Der Wiederaufbau soll in zwei Stufen erfolgen. Zunächst ist geplant, die Zahl der operationellen Satelliten bis 2007 auf 18 zu erhöhen. Bis 2011 soll dann die vollständige Konstellation mit 24 Satelliten verfügbar sein (Slater 2004). Dazu ist der Einsatz von Satelliten mit einer deutlich längeren Lebensdauer notwendig.

Gegenwärtig wird eine neue, dritte Satellitengeneration am Scientific Research Institute of Applied Mechanics (NPO PM) in Zheleznogorsk entwickelt. Die GLONASS-K Satelliten wiegen mit 800 kg etwa die Hälfte der M-Satelliten und sind auf eine Lebensdauer von zehn Jahren ausgelegt. Sie sollen über ein drittes ziviles Signal verfügen und Integritätsinformationen ausstrahlen.

Tabelle 8.2: Vergleich der globalen Satellitennavigationssysteme GPS, GLONASS, GALILEO

<b>Merkmale</b>	<b>GPS</b>	<b>GLONASS</b>	<b>GALILEO</b>
<b>Raumsegment</b>			
Satellitenanzahl	21+3	21+3	27+3
Bahnebenen	6	3	3
Inklination	55°	64,8°	56°
Bahnhöhe	20.180 km	19.100 km	23.616 km
Umlaufzeit (Sternzeit)	12 h	11 h 15 min	14 h 24 min
Bahnwiederholung (Sternstage)	1	8	10
Satellitenuhren	Cs, Rb	Cs	Rb, H-Maser
FOC	1995	1993 (1996)	2008
aktuelle SV-Generation	GPS IIR	GLONASS-M	
Lebensdauer (Jahre)	7,5	5–7	15
<b>Navigationsmitteilung</b>			
Ephemeriden- repräsentation	Keplerelemente mit Störtermen	9 Parameter ECEF (p, v, a)	
Raumbezugssystem	WGS 84	PZ-90	GTRF
Zeitbezugssystem	UTC [USNO]	UTC [SU]	GST
Systemzeit	ohne Schaltsekunde	mit Schaltsekunden	ohne Schaltsekunde
Almanach Übertragung	12,5 min	2,5 min	
<b>Signalstruktur</b>			
Signaldivision	CDMA	FDMA	CDMA
Trägerfrequenzen	L1 (1575,42 MHz) L2 (1227,60 MHz)	L1 (1602-1615 MHz) L2 (1246-1256 MHz)	E1/E2 (1559-1591 MHz) E6 (1260-1300 MHz) E5 (1164-1215 MHz)
Codes	C/A-Code auf L1 P(Y)-Code auf L1, L2	SP-Code auf L1 HP-Code auf L1, L2	
Code-Typ	Gold Code	PRN Code	
Code Chip Länge	C/A-Code 293 m P-Code 29,3 m	SP-Code 586,7 m HP-Code 58,7 m	
<b>Kontrollsegment</b>			
Bodenkontrollstationen	5+14 weltweit	7 GUS	30 GSS weltweit
Uplink-Stationen			9
Hauptkontrollstation	Colorado Springs	Moskau	2 GCC
Services	SPS, PPS	SP, HP	OS, SOL, CS, PRS, SAR
Systembetreiber	U.S. Air Force	VKS	Konzessionär
Zuständig f. zivile Nutzer	U.S. Coast Guard	CSIC	Konzessionär

Für die regelmäßige Veröffentlichung von Informationen über GLONASS für zivile Nutzer ist das CSIC, im Russischen mit KNIT abgekürzt, verantwortlich. Mit dem GLONASS Interface Control Document (GLONASS-ICD 2002) veröffentlicht das CSIC die Grundlage der zivilen GLONASS-Nutzung. Verantwortlich für das Navigationssystem ist ausschließlich das russische Verteidigungsministerium, betrieben wird es vom Militär der Russischen Föderation, Teilstreitkräfte Weltraum (VKS).

### 8.3.2 GLONASS-Signalstruktur

GLONASS-Satelliten senden zwei PRN-Codesegmente und eine Navigationsmitteilung auf den ihnen zugewiesenen Trägerfrequenzen im L1- und L2-Band. Dabei sendet jeder Satellit das gleiche Code-seg-

ment auf unterschiedlichen Trägerfrequenzen. Dieses Verfahren wird als Frequency Division Multiple Access (FDMA) bezeichnet und unterscheidet sich grundsätzlich vom CDMA (Code Division Multiple Access)-Verfahren der GPS-Signalstruktur, bei dem jeder GPS-Satellit individuelle Codesegmente auf den beiden gemeinsamen Trägerfrequenzen ausstrahlt.

Die Frequenzen der GLONASS-Satelliten berechnen sich mit  $k = 0, 1, 2, \dots, 24$ , der Nummer des Frequenzkanals, nach:

$$f_{k1} = 1602 \text{ MHz} + k \cdot 0,5625 \text{ MHz}, \quad (8.1)$$

$$f_{k2} = 1246 \text{ MHz} + k \cdot 0,4375 \text{ MHz}. \quad (8.2)$$

Die Zuordnung der einzelnen Frequenzkanäle zu den Satelliten bzw. deren "slots" im Raumsegment ist im Systemalmanach gegeben. Der Kanal 0 ist nur für Testzwecke vorgesehen.

Im September 1993 wurden die Frequenzkanäle neu zugeteilt. Die Kanäle 15–20 werden nicht mehr verwendet, um Interferenzen mit radioastronomischen Signalen im Frequenzband 1610,6–1613,8 MHz sowie mit oberhalb von 1610 MHz sendenden Mobilten Satellitendiensten (MSS) zu vermeiden. Die Kanäle 21–24 wurden von je zwei Satelliten in antipodalen Positionen gemeinsam verwendet. Nach einem Drei-Stufenplan (GLONASS-ICD 2002) wird die Anzahl der Sendefrequenzen bis zum Jahr 2005 stufenweise abgesenkt. Zwischen 1998 und 2005 werden nur die Kanäle 0–12 verwendet, die nach 2005 auf die Kanäle -7 bis +6 reduziert werden. Die L1-Frequenzen befinden sich dann im Bereich 1598,0625–1605,3750 MHz und die L2-Frequenzen im Bereich 1242,9375–1248,6250 MHz (vgl. Abb. 8.9).

Mit dem Standard Precision (SP) Code und dem High Precision (HP) Code verfügt GLONASS über zwei PRN-Codes zur Pseudostreckenmessung. Deren Wellenlängen sind jedoch doppelt so lang wie die korrespondierenden GPS-Codes, so dass sich für GLONASS-Code-Beobachtungen schlechtere Auflösungen ergeben. Für den SP-Code wird eine horizontale Genauigkeit von 50–70 m und eine vertikale Genauigkeit von 70 m angegeben.

### 8.3.3 Kombination von GPS und GLONASS

Die kombinierte Nutzung von GPS und GLONASS ist besonders interessant für Anwendungen in Gebieten, in denen mehr oder weniger starke Sichtbarkeitsbeschränkungen des Horizonts vorliegen. Mit nominell zwei mal 24 Satelliten ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass auch in stärker abgeschatteten Umgebungen mehr als sechs Satelliten zur differentiellen Positionsbestimmung verfügbar sind.

Bei der Kombination von GPS- und GLONASS-Beobachtungen sind die unterschiedlichen Bahnrepräsentationen, Zeit- und Raumbezugssysteme zu berücksichtigen. GLONASS beschreibt die Broadcast Ephemeriden in Form von geozentrischen kartesischen Koordinaten und Geschwindigkeiten im Referenzsystem PZ-90, während die Broadcast Ephemeriden der GPS-Satelliten als Kepler-Elemente mit Störparametern bezogen auf das WGS 84 verbreitet werden. Die GLONASS-Systemzeit (GLONASST) wird laufend mit UTC(SU) für Moskau abgeglichen,

$$\text{GLONASST} = \text{UTC(SU)} + 3 \text{ h } 00 \text{ min} \quad (8.3)$$

was die Einführung von Schaltsekunden bis zu zweimal jährlich notwendig macht. UTC(SU) ist die lokale Realisierung des UTC(BIPM) in Russland und unterscheidet sich um einige Mikrosekunden von UTC(USNO). Die GPS-Systemzeit ist dagegen eine kontinuierliche Zeitskala und hat sich seit dem Systembeginn am 6. Januar 1986 um 13 Schaltsekunden von UTC entfernt.

Durch eine 7-Parameter-Transformation werden alle Positionen vom PZ-90 in das WGS 84 transformiert. Lange Zeit mangelte es an kombinierten Zweifrequenz-GPS/GLONASS-Empfängern und einer

ausreichenden weltweiten Verteilung von Stationen, um dort durch simultane GPS- und GLONASS-Beobachtungen globale Transformationsparameter abzuleiten. Mit dem Internationalen GLONASS-Experiment (IGEX-98) wurden die weltweiten Bemühungen koordiniert. Während der mehrmonatigen Kampagne wurden aus den weltweiten GPS/GLONASS-Beobachtungen präzise Ephemeriden mit einer Genauigkeit von besser als 50 cm berechnet, Datumparameter zwischen den Referenzsystemen PZ-90, WGS 84 und ITRF abgeleitet und Differenzen der Zeitbezugssysteme ermittelt (Slater et al. 1999). Nach Abschluss der IGEX-Kampagne wird die Arbeit von inzwischen 45 Stationen mit GPS/GLONASS-Zweifrequenzempfängern im Rahmen des IGS International GLONASS Service (IGLOS) fortgesetzt, deren Daten in das IGS Global Data Center Archiv einfließen. Routinemäßig werden präzise Bahnen mit einer Genauigkeit von 2 dm durch das BKG, die ESA und das russische Kontrollzentrum berechnet und die Lösungen kombiniert. Das IGLOS-Netz ist inzwischen in das IGS-Netz aufgegangen.

Bei der Auswertung von GLONASS-Trägerphasenbeobachtungen ist die Mehrdeutigkeitslösung aufgrund der unterschiedlichen Trägerfrequenzen besonders problematisch für alle Ansätze, die auf differenzierten Beobachtungen beruhen. Walsh, Daly (1996), Habrich (2000) und Roßbach (2001) haben dazu verschiedene Lösungen erarbeitet.

In der Postprocessing-Software GEONAP und der Echtzeitsoftware GNNET basiert die Auswertung der GLONASS-Beobachtungen auf deren Transformation in das GPS-System. Dazu werden die GLONASS-Messepochen in das GPS-Zeitsystem umgerechnet und die GLONASS-Ephemeriden in das WGS 84 transformiert. Die Mehrdeutigkeiten werden im Modell der undifferenzierten Beobachtungen für jede GLONASS-Trägerfrequenz gelöst. In der Beobachtungsgleichung der kombinierten GPS/GLONASS-Messungen muss zwischen den Signalen der beiden Systeme unterschieden werden:

$$\varphi_{GG} = f(GPS, GLO) \quad (8.4)$$

Kombinierte GPS/GLONASS-Lösungen sind auch bei differentiellen Echtzeitpositionierungen möglich. GLONASS-Korrekturdaten sind seit der RTCM-Version 2.2 vom Januar 1998 definiert. Vernetzungsparameter sind gleichermaßen für GLONASS berechenbar und werden im Typ 59 übertragen.

Zu den mit GPS/GLONASS-Empfängern ausgerüsteten Referenzstationsnetzen gehört der Echtzeitpositionierungsdienst ascos der Ruhrgas AG (Loef 2003) mit 28 eigenen Stationen. Dieser seit dem Jahr 2000 deutschlandweit aufgebaute Dienst nutzt zusätzlich 14 Stationen des BKG, die ebenfalls mit GPS/GLONASS-Empfängern ausgestattet sind, sowie 260 SAPOS-Stationen. Weitere Beispiele sind seit 1999 mit GPS/GLONASS arbeitende Referenzstationsnetze der österreichischen Energieversorgungsunternehmen im Burgenland (BEWAG) und in Kärnten (KELAG) sowie seit 2001 in Wien (WIENSTROM) (Klug, Weber 2003). In drei weiteren österreichischen Bundesländern befinden sich GPS/GLONASS-Referenzstationsnetze im Aufbau.

#### 8.3.4 Kombinierte GPS/GLONASS-RTK-Ergebnisse

Die ersten Möglichkeiten, Erfahrungen mit kombinierten GPS/GLONASS-Beobachtungen zu sammeln, boten sich am Institut für Erdmessung ab Dezember 1997. Standen zunächst nur Einfrequenzempfänger (Ashtech GG24) zur Verfügung, konnte das IfE im Januar 1999 zwei der ersten Zweifrequenzempfänger JPS Legacy GGD mit Choke-Ring-Antennen (RegAnt-2) erwerben. Im Rahmen der Diplomarbeiten von Flügel (1998) und Allport (1999) wurde die Leistungsfähigkeit kombinierter GPS/GLONASS-Messungen untersucht. Die Voraussetzungen für den Einsatz kombinierter GPS/GLONASS-Empfänger auf den SAPOS-Referenzstationen und deren Nutzung im Rahmen des SAPOS-Dienstes HEPS waren zu klären, da in Hamburg beabsichtigt war, die vier Referenzstationen mit den JPS-Zweifrequenzempfängern auszustatten. Die Auswertungen erfolgten im Postprocessing mit GEONAP, das um GLONASS-Programmmodule erweitert wurde, und für die Echtzeitlösungen mit GNRT-K.

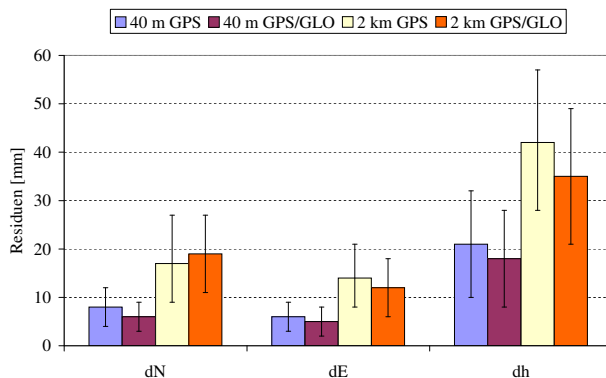


Abbildung 8.1: Residuen statischer GPS- und GPS/GLONASS-Echtzeitlösungen vom 21.-24.04.1998

Bei den Postprocessingauswertungen waren keine signifikanten Koordinatendifferenzen zwischen reinen GPS- und kombinierten GPS/GLONASS-Lösungen feststellbar. Dies gilt gleichermaßen für kurze Basislinien bis 40 m und für Basislinien mittlerer Länge bis maximal 18 km. Bei den Echtzeitlösungen waren die Basislinien aufgrund des eingesetzten UHF-Korrekturdatensenders auf maximal 3 km begrenzt. Gegenüber den aus der GPS-Postprocessinglösung bestimmten Sollkoordinaten ergeben sich die in Abb. 8.1 dargestellten Koordinatendifferenzen der GPS- bzw. GPS/GLONASS-Echtzeitlösungen. Die Differenzen zwischen der reinen und der kombinierten Lösung sind geringfügig, die Abweichungen von der Solllösung in der Lage mit bis zu 10 mm bei den kurzen Basislinien und bis zu 22 mm auf den mittleren Basislinien für RTK-Lösungen typisch.

In Bezug auf die Zeit, die zur Mehrdeutigkeitslösung (TTFA) mit dem Echtzeitalgorithmus von GNRT-K benötigt wird, unterscheiden sich die kombinierten GPS/GLONASS-Messungen deutlich von den Messungen ohne GLONASS. Bei drei Tests über je 24 Stunden benötigen 85% aller kombinierten Lösungen weniger als 60 Sekunden, 95% aller Lösungen erfolgen innerhalb von 140 Sekunden (Abb. 8.2). Bei den GPS-Messungen liegen innerhalb einer Minute dagegen nur zwei Drittel aller Lösungen vor, 95% der Lösungen werden erst nach 220 Sekunden erreicht (Abb. 8.3). In den beiden Abbildungen sind die Häufigkeit und die Summenhäufigkeit von TTFA-Zeiten in Intervallen von 10 Sekunden dargestellt. Ein aus praktischen Gründen gewähltes Zeitlimit von 5 Minuten wurde von 2,6% der GPS-Lösungen überschritten, bei den GPS/GLONASS-Lösungen nur von 1,9%.

Die kürzeren Lösungszeiten für Mehrdeutigkeiten bei den kombinierten GPS/GLONASS-Messungen sind darauf zurückzuführen, dass GLONASS ohne Einschränkung durch eine Systemsicherungstechnik wie SA bei GPS genauere Näherungskordinaten für die Absolutposition bereitstellt. Dies ermöglicht eine stärkere Eingrenzung des Suchraumes und beschleunigt den Suchalgorithmus.

Die TTFA-Zeiten dürfen nicht ohne Berücksichtigung der Fehlerrate der Mehrdeutigkeitslösungen beurteilt werden. Durch Vorgabe eines Zuverlässigkeitsparameters wird die Initialisierungszeit beeinflusst. Schnellere Lösungen erhöhen das Risiko für Fehlinitialisierungen. Bei den kombinierten Messungen war die Fehlerrate mit 3% etwas größer als bei den GPS-Lösungen, von denen 2% als fehlerhaft eingestuft werden mussten.

Die Nutzung von GLONASS zusätzlich zu GPS verringert zum einen die Abhängigkeit von einem einzelnen Navigationssystem. Zum anderen erhöht sich die Zahl der verfügbaren Satelliten, was insbesondere in Gebieten mit stärkeren Abschattungen durch Berge, Wald oder Gebäude die satellitengestützte Positionsbestimmung unter Umständen überhaupt erst ermöglicht. In Abb. 8.4 ist die über Hannover maximal verfügbare Anzahl an Satelliten für den Messzeitraum Herbst 1999 dargestellt. In dem Zeitraum waren 27 GPS-Satelliten und 17 GLONASS-Satelliten operationell. Bei einem weitestgehend abschattungsfreien Horizont können Signale von 6 bis 9 GPS-Satelliten empfangen werden. Bei kombinierten GPS-GLONASS-Beobachtungen erhöht sich die Zahl der Satelliten auf 9 bis 15 Satelliten. Durch die



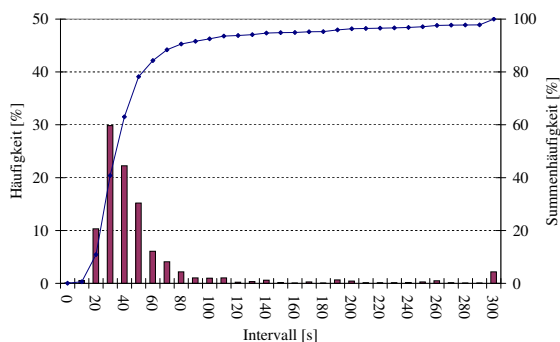


Abbildung 8.2: Dauer der Mehrdeutigkeitslösung (TTFA) statischer GPS/GLONASS-Echtzeitbeobachtungen

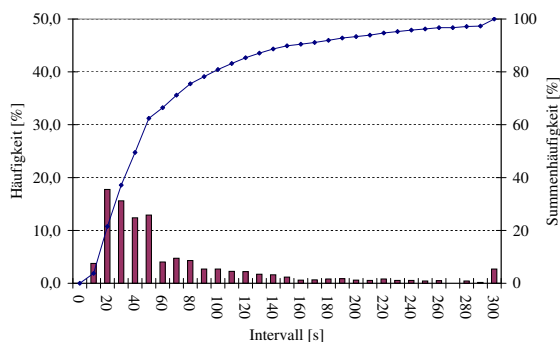


Abbildung 8.3: Dauer der Mehrdeutigkeitslösung (TTFA) statischer GPS-Echtzeitbeobachtungen

unvollständig besetzten GLONASS-Bahnen ergeben sich für Messungen an abgeschatteten Standorten günstige und weniger günstige Zeitfenster. In den günstigen Zeitfenstern sind im Durchschnitt 4 bis 6 GPS-Satelliten und 3 bis 6 GLONASS-Satelliten gleichzeitig sichtbar. Unabhängig von der Satellitenanzahl bleibt durch größere Abschattungen allerdings die Satellitengeometrie eingeschränkt.

Die zweite Untersuchung der GPS- und GLONASS-Beobachtungen mit den JPS Legacy GGD Zweifrequenzempfängern mit Choke-Ring-Antennen (RegAnt-2) weist ungünstigere Ergebnisse für die kombinierten Lösungen nach. Die Standardabweichungen der Doppeldifferenzresiduen einer Zero-Baseline betragen für die GPS-L1 und L2-Trägerphasen 1 mm mit maximalen Residuen von 4 mm. Die Residuen der GLONASS-Beobachtungen sind um Faktor 3–4 größer und auch die maximalen Residuen sind mit bis zu 12 mm um den gleichen Faktor größer, wie in Abb. 8.5 gezeigt.

In Abb. 8.6 sind die Koordinatenabweichungen von Echtzeit-GPS und GPS/GLONASS-Lösungen gegenüber Sollkoordinaten einer GPS-Postprocessinglösung zusammengefasst. Die Balken entsprechen dem Mittelwert der Abweichungen, die Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichung der einzelnen Echtzeitlösungen über eine Basislinie von 3 km, die an drei Tagen im November 1999 beobachtet wurde. Die reinen GPS-Lösungen sind genauer als die kombinierten GPS/GLONASS-Lösungen, was auf das geringere Messrauschen der GPS-Signale zurückzuführen ist. Für beide Lösungsvarianten gilt, dass die Längskomponente um das zwei- bis dreifache genauer ist als die Breitenkomponente, die in etwa das Genauigkeitsniveau der Höhenkomponente aufweist.

Auch die Initialisierungszeit ist bei den kombinierten GPS/GLONASS-Beobachtungen um ca. 20% länger (Tab. 8.3). Hier wirkt sich die Verarbeitung zusätzlicher GLONASS-Zweifrequenzbeobachtungen

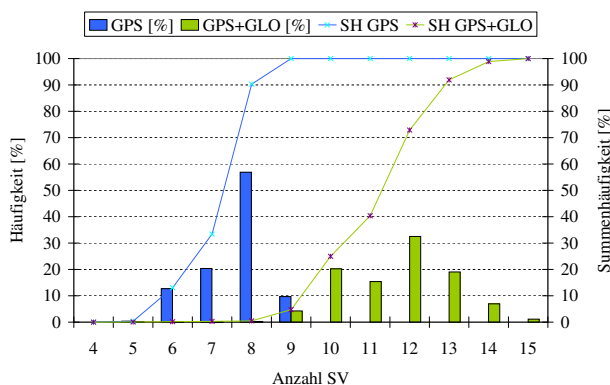


Abbildung 8.4: Anzahl der durchschnittlich sichtbaren GPS- und GLONASS-Satelliten über Hannover (Herbst 1999)

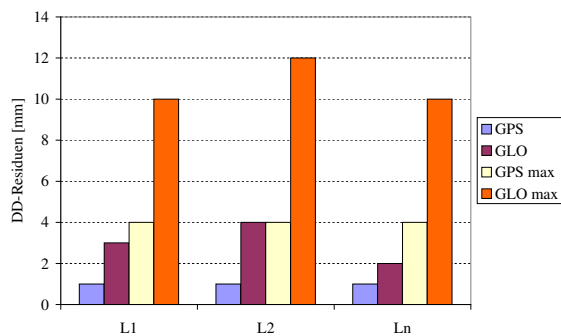


Abbildung 8.5: Doppeldifferenzresiduen einer Zero-Baseline von GPS- und GLONASS-Trägerphasenbeobachtungen

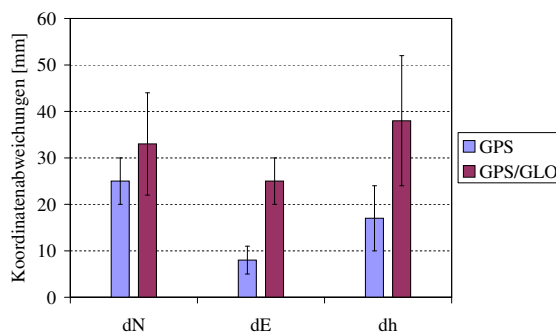


Abbildung 8.6: Genauigkeit von Echtzeit-GPS- und GPS/GLONASS-Zweifrequenzbeobachtungen

mit dem komplizierteren Mehrdeutigkeitslösungsalgorithmus nachteilig aus. Während bei den reinen GPS-Lösungen weniger als 0,5% Ausreißer auftreten, erhöht sich die Ausreißerquote auf ca. 6% bei den kombinierten GPS/GLONASS-Messungen.

Die zuvor beschriebenen Ergebnisse gelten für eine abschattungsfreie Umgebung. Genauigkeit, Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der GPS-Lösungen sind denen der kombinierten GPS/GLONASS-Lösungen überlegen. Schon bei Abschattungen über  $20^\circ$  kann allerdings die Zahl der sichtbaren GPS-Satelliten auf unter fünf sinken. Bei größeren Abschattungen von bis zu  $50^\circ$  werden die GLONASS-Satelliten dann unverzichtbar, um mit mindestens fünf verbleibenden Satelliten eine Positionsbestimmung zu ermöglichen.

Auswertungen mit verschiedenen Abschattungssituationen zeigen, dass die Genauigkeit der kombinierten Lösungen praktisch unabhängig von dem Elevationswinkel der Abschattungen sind. Über einen Bereich von  $0^\circ$  bis  $50^\circ$  bleibt die innere Positionierungsgenauigkeit bei  $\Delta N = 5$  mm,  $\Delta E = 4$  mm und  $\Delta h = 16$  mm. Auch die Zuverlässigkeit sinkt bei größeren Abschattungen nicht. Unabhängig von dem Elevationswinkel treten bei 6–7% der Lösungen Abweichungen von über 10 cm gegenüber der Solllösung auf. Lediglich die Dauer der Mehrdeutigkeitslösungen steigt mit zunehmendem Elevationswinkel. Die TTFA-Mittelwerte und Maximalwerte steigen um das knapp Vierfache an (Abb. 8.7).

Die Ergebnissen der Jahre 1998 und 1999 lassen die Schlussfolgerung zu, dass kombinierte GPS/GLONASS-Beobachtungen insbesondere bei Echtzeitpositionierungen die Redundanz der Beobachtungen erhöhen. Bei ausreichender Satellitenzahl bleiben Positionsbestimmungen auch bei stärkeren Abschattungen von bis zu  $50^\circ$  möglich. Die Ergänzung um GLONASS-Beobachtungen führte in Bezug auf Genauigkeit, Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der Echtzeitlösungen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Mit den Einfrequenzempfängern verbesserten sich die kombinierten Lösungen, während sie sich mit den Zweifrequenzempfängern verschlechterten. Dies ist auf die unvollständige GLONASS-Konstellation und die zahlreichen Probleme mit den GLONASS-Signalen zurückzuführen. Außerdem war der Aus-

Tabelle 8.3: Dauer der Mehrdeutigkeitslösungen für Echtzeit-GPS- und GPS/GLONASS-Zweifrequenzmessungen

TTFA [s]	GPS	GPS/GLONASS
Min	16	17
Mittel	19	23
Max	50	70

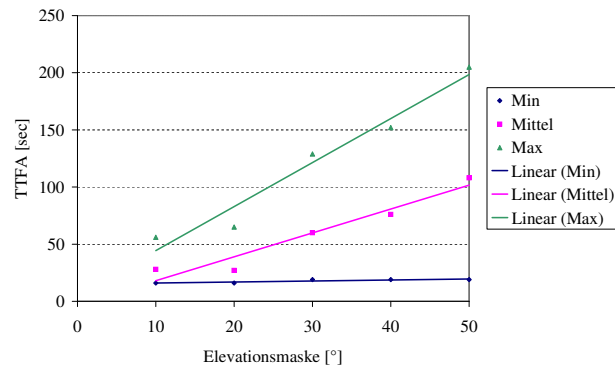


Abbildung 8.7: Abhängigkeit der TTFA bei Echtzeit-GPS/GLONASS-Messungen vom Grad der Abschattungen

wertealgorithmus für die kombinierten Zweifrequenzbeobachtungen noch nicht optimiert. Aufgrund des weiteren Verfalls der GLONASS-Konstellation und der Entscheidung des Landesbetriebes Geoinformation und Vermessung, die vier Hamburger SAPOS-Referenzstationen nicht mit GPS/GLONASS-Empfänger auszustatten, wurden die weiteren GLONASS-Untersuchungen eingestellt.

## 8.4 GALILEO

Aus politischen und ökonomischen Gründen gab es in der EU bereits seit den achtziger Jahren Bestrebungen für ein eigenes Satellitennavigationssystem. Erst Ende der neunziger Jahre konnten diese Pläne konkretisiert werden. Das als GALILEO bezeichnete Projekt wird gemeinsam von der Europäischen Union (EU) und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) unter Beteiligung der europäischen Raumfahrtindustrie entwickelt. Es soll zur Entwicklung zahlreicher Anwendungen beitragen, die direkt oder indirekt mit Politikbereichen der Europäischen Gemeinschaft zusammenhängen. Dazu gehören der Straßen- und Schienenverkehr sowie die Luftfahrt, Landwirtschaft und Fischerei, Kriminalitätsbekämpfung und zahlreiche andere Anwendungen. Durch den Aufbau einer europäischen Industrie für den Navigationsmarkt und ortsbezogene Dienste wird die Schaffung von über 100.000 Arbeitsplätzen erwartet (EC 2005).

Von Anfang an wurde ein europäisches Satellitennavigationssystem unter ausschließlich ziviler Kontrolle gefordert. Es soll ein unabhängiges System sein, aber volle Interoperabilität mit den beiden militärischen Satellitennavigationssystemen GPS und GLONASS gewährleisten. GALILEO soll dem modernsten technischen Standard entsprechen und global verfügbar sein. Durch ein differenzierteres Angebot an Positionierungs- und Zeitdiensten sollen vielfältige zivile Nutzungen ermöglicht werden.

In diesem Kapitel werden der Stand des GALILEO-Projektes und dessen weitere Entwicklung beschrieben sowie die Grundzüge der Systemarchitektur und der Signalstruktur erläutert. Abschließend wird das Potential von GALILEO für die präzise Echtzeitpositionierung betrachtet.

### 8.4.1 Stand und Entwicklung des GALILEO-Projektes

Einer Empfehlung der Europäischen Kommission zum Bau eines eigenen Satellitennavigationssystems (EC 1999) folgend wurde mit einer Entschließung des EU-Verkehrsrates am 17./18.06.1999 die Definitionsphase des GALILEO-Projektes eingeleitet. In einer grundlegenden Systemstudie und mehreren Detailstudien wurde die Machbarkeit und grundsätzliche Ausgestaltung des GALILEO-Systems

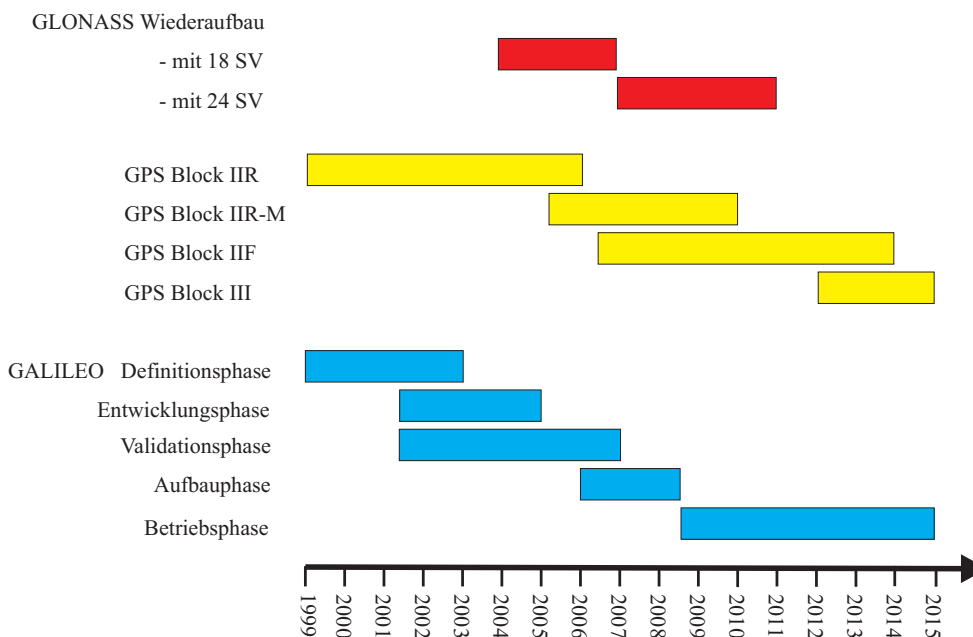


Abbildung 8.8: Zeitplan für die weitere Entwicklung von GPS, GLONASS und GALILEO

erarbeitet. Nennenswert sind die Studien GALA (EC) für die Systemarchitektur und GalileoSat (ESA) für die Definition des Raumsegmentes.

Die Entwicklung des GALILEO-Projektes wurde in mehrere Phasen, die in Abb. 8.8 dargestellt sind, bis zur geplanten Fertigstellung im Jahr 2008 unterteilt. Der Definitionsphase folgt die Entwicklungsphase und eine Phase der In-Orbit-Validierung (IOV). Der Systemaufbau soll 2006 beginnen und Mitte 2008 mit dem Übergang in die Betriebsphase abgeschlossen sein.

Strittige Finanzierungsfragen insbesondere über die Anteile öffentlicher und privater Mittel führten zwischen 2000 und 2002 mehrfach zu Verzögerungen des GALILEO-Projektes. Die Entwicklungsphase konnte erst am 26.03.2002 mit dem Beschluss des EU-Verkehrsmministerrates eingeleitet werden, der 450 Mio. EUR zur Finanzierung der Entwicklungsphase freigegeben hat. Weitere 550 Mio. EUR trägt die ESA zur Entwicklungsphase bei. EU und ESA haben daraufhin ein Gemeinsames Unternehmen (GALILEO Joint Undertaking (GJU)) mit Sitz in Brüssel gegründet, das für die Durchführung der Entwicklungs- und Validierungsphase zuständig ist. Darüber hinaus bereitet das GJU die Aufbau- und Betriebsphase mit der Ausschreibung für einen kommerziellen Betreiber von GALILEO vor. Die erste Stufe des Auswahlverfahrens für den künftigen Konzessionsnehmer wurde am 06.02.2004 abgeschlossen. Es folgten in einer zweiten Stufe Verhandlungen mit ausgewählten Konsortien. Die beiden verbleibenden Konsortien iNavSat und Eurely haben am 27.06.2005 ein gemeinsames Angebot abgegeben, nachdem sich das Gemeinschaftsunternehmen auf keinen Konzessionär einigen konnte. Die Konzessionsvergabe bezieht sich sowohl auf die Aufbauphase ab 2006 als auch auf die Betriebsphase ab 2008 und gilt für 20 Jahre.

Teil der Entwicklungsphase ist die Phase-B2-Studie, in der die Ergebnisse der vorhergehenden Studien zu einer einheitlichen Systemdefinition zusammengefasst und Spezifikationen für die weiteren Phasen erstellt werden (GALILEO Design Consolidation). Gegenwärtig wird das GALILEO System Test Bed (GSTB) aufgebaut, das zum Test der zukünftigen GALILEO-Infrastruktur dient. In der ersten Stufe GSTB-V1 sammeln Bodenstationen GPS- und GLONASS-Beobachtungen, die in einem Rechenzentrum der Europäischen Weltraumagentur in Noordwijk (ESA-ESTEC) prozessiert werden, um die Algorithmen zur Bahnbestimmung, Zeitsynchronisation und zur Integritätsüberwachung zu verifizieren.

Parallel dazu werden in einer zweiten Stufe (GSTB-V2) bereits zwei Testsatelliten gebaut, die bis Ende 2005 ins All geschossen werden sollen, um die für GALILEO reservierten Frequenzen zu besetzen. Bis Ende 2006 sollen weitere experimentelle Satelliten folgen, bevor ab 2007 die vom Konzessionär beschriebenen operationellen Satelliten für die endgültige Konstellation von 27 Satelliten und drei Reservesatelliten gestartet werden. Die Entwicklung und Lieferung der GALILEO-Infrastruktur erfolgt durch GALILEO Industries, einem im Jahr 2000 gegründeten Gemeinschaftsunternehmen der europäischen Raumfahrtindustrien mit Sitz in Ottobrunn und Rom.

GSTB-V1 und GSTB-V2 sind Teil der In-Orbit-Validierung (IOV). Mit den bis zu vier experimentellen Satelliten und der Bodeninfrastruktur wird bis Ende 2006 das Gesamtsystem getestet, bevor in der nachfolgenden Aufbauphase das Raum- und Bodensegment vollständig ausgebaut wird. Zusätzlich wird bereits EGNOS in das GALILEO-System integriert. Zur Untersuchung der Signalstruktur, zur Unterstützung der Entwicklung von GALILEO-Empfängern sowie von GALILEO-Anwendungen wird mit dem German GALILEO Test Environment (GATE) in der Nähe von Weilheim, südwestlich von München, eine Testumgebung eingerichtet (Wolf et al. 2003). Die Infrastruktur besteht aus lokalen terrestrischen GALILEO-Sendern auf Bergkuppen, deren Signale gemeinsam mit denen der GSTB-Satelliten verarbeitet werden sollen, und einem Kontrollsegment. Es besteht somit die Möglichkeit, eine GALILEO-Satellitenkonstellation zu emulieren, bevor eine ausreichende Anzahl von Satelliten im Weltraum zur Verfügung steht.

Nach dem für 2008 geplanten Beginn der operationellen Phase übernimmt der Konzessionär den Betrieb von GALILEO. An Stelle des gemeinsamen Unternehmens tritt mit Beginn der Aufbauphase eine Aufsichtsbehörde (European GNSS Supervisory Authority), die aus einem Verwaltungsrat, einem Wissenschaftlich-Technischen Komitee und einem Sicherheitskomitee besteht. Der Verwaltungsrat wird aus Vertretern aller Mitgliedsländer besetzt. Die Aufsichtsbehörde wird die öffentlichen Interessen vertreten und für das Europäische GNSS-Programm zuständig sein (EC 2004).

#### **8.4.2 GALILEO-Systemarchitektur**

Aus den verschiedenen Vorschlägen für das Raumsegment kristallisierte sich eine sogenannte Walker-Konstellation 27/3/1 mit 27 Satelliten in drei Bahnebenen mit jeweils einem aktiven Ersatzsatelliten heraus. Innerhalb der Bahnebenen haben die Satelliten einen Abstand von  $40^\circ$  zueinander, wobei deren Anordnung um jeweils  $40^\circ/3$  zwischen den Bahnebenen verschoben ist. Die 30 Satelliten befinden sich in einem Medium Earth Orbit (MEO) in einer Höhe von 23.616 km. Mit einer Inklination von  $56^\circ$  werden geographische Breiten bis  $75^\circ$  (Nordkap) mit GALILEO-Signalen abgedeckt. Tab. 8.2 gibt die weiteren GALILEO-Systemparameter wieder, soweit sie bereits bekannt sind.

Gegenüber dem GPS-System beruht das GALILEO-Bodensegment mit 30 Sensorstationen (GALILEO Sensor Stations, GSS), 2 Kontrollzentren (GALILEO Control Centers, GCC) und 9 Uplink-Stationen (Mission Uplink Stations, ULS) zur Übertragung von Navigations- und Integritätsdaten sowie weiteren 5 Bodenstationen zur Übertragung telemetrischer Daten auf einem wesentlich besser ausgebauten und weltweit besser verteilten Bodensegment. Eine weitere Steigerung der Genauigkeit und Integrität ist durch die regionale Augmentation mit EGNOS geplant.

#### **8.4.3 GALILEO-Signalstruktur**

Eine mögliche Signalstruktur für GALILEO wurde von der Signal Task Force (STF) der Europäischen Kommission vorgeschlagen (Hein et al. 2002). In Abb. 8.9 ist die Aufteilung in drei Frequenzbänder im Zusammenhang mit den GPS- und GLONASS-Frequenzen im L-Band dargestellt. Die beiden Frequenzbänder 1164–1215 MHz (E5) und 1260–1300 MHz (E6) wurden auf der Weltfunkkonferenz 2000

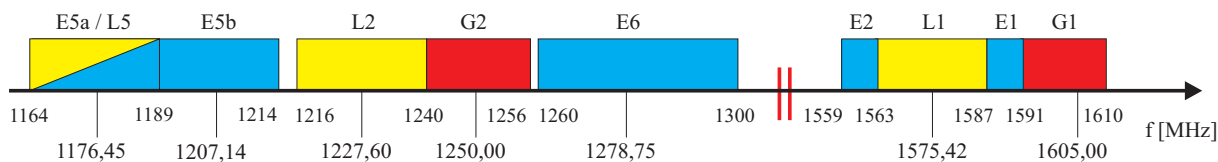


Abbildung 8.9: Frequenzspektrum mit der neuen GPS-Signalstruktur (L), den GLONASS- (G) und den geplanten GALILEO-Signalen (E)

(WRC2000) in Istanbul für die Satellitennavigation freigegeben und auf der nachfolgenden Weltfunkkonferenz 2003 für GALILEO reserviert.

Die Trägerphasen E5a und E5b sind mit einer Bandbreite von jeweils 24 MHz im unteren L-Band angeordnet. Für die Trägerphase E6 stehen 40 MHz Bandbreite im mittleren L-Band zur Verfügung. Im oberen L-Band flankieren die beiden Signale E1 und E2 das GPS-L1-Signal mit jeweils 4 MHz Bandbreite, um die interoperable Nutzung mit GPS zu ermöglichen. Das Signal E5a und die geplante GPS L5 Frequenz übertragen unterschiedlich modulierte Codes auf der gleichen Trägerfrequenz. Das Problem der Überlagerung der L1- und L5-Signale sowie der Konflikt zwischen dem M-Code- und PRS-Signal konnte nach zweijährigen Verhandlungen mit den USA mit einer abschließenden Einigung am 26.6.2004 gelöst werden.

Auf jeder der vier Frequenzen werden nach dem CDMA-Prinzip satellitenindividuelle breitbandige Codes aus Pseudozufallszahlenfolgen moduliert, die wie bei GPS zur Pseudostreckenmessung verwendet werden. Für Details zur Modulation, Codelänge, Chiprate und Coderauschen und der Mindestempfangsleistung siehe Hein et al. (2002).

Wichtige Kriterien bei der Wahl der Frequenzen waren die Möglichkeiten zur Bestimmung der Phasemehrdeutigkeiten durch Linearkombinationen, die Genauigkeit ionosphärischer Korrekturen und geringe Mehrwegeeffekte auf Codes und Trägerphasen. Die gewählten Frequenzen sollten eine robuste Phasemessung durch ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis ermöglichen und weitestgehend unanfällig sein gegenüber Signalmischungen und Interferenzen.

Während die Signale E5a und E5b im unteren L-Band genauso wie E1 und E2 im oberen L-Band vor Interferenzen durch andere Signale geschützt sind, kann E6 im mittleren L-Band durch Radarstrahlen beeinträchtigt werden. Anfällig für Mehrwegefehler sind die schmalen Frequenzbänder für E1 und E2. Mit drei Frequenzbändern können zur Mehrdeutigkeitsbestimmung Three Carrier Ambiguity Resolution (TCAR) Techniken eingesetzt werden (Teunissen et al. 2002). Die eng beieinanderliegenden Frequenzen sind allerdings nicht optimal zur absoluten Mehrdeutigkeitslösung, aber ausreichend zur Bestimmung relativer Mehrdeutigkeiten.

Die Frequenzen werden an Bord der Satelliten aus zwei Frequenznormalen generiert. Dabei handelt es sich um eine Rubidium-Atomuhr und einen passiven Wasserstoff-Maser. Beide Uhren wurden für GALILEO neu entwickelt, die Technik der Wasserstoff-Uhren wird erstmals im Weltraum eingesetzt.

#### 8.4.4 GALILEO-Dienste

Standardmäßig werden allen Nutzern Zweifrequenz-Daten zur Verfügung stehen, die eine Positionierungsgenauigkeit im Meterbereich in Echtzeit ermöglichen. Darüber hinaus sind gegenwärtig fünf reine GALILEO-Dienste geplant, die sich von den GPS-Nutzungsmöglichkeiten insbesondere durch die Gewährleistung definierter Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsniveaus unterscheiden:

- Offener Dienst (Open Service, OS)
- Kommerzieller Dienst (Commercial Service, CS)

Tabelle 8.4: Verteilung der GALILEO-Dienste auf die Frequenzbänder

Frequenzband	GALILEO-Dienst			
	OS	CS	SOL	PRS
E5	•	•	•	–
E6	–	•	–	•
E1/E2	•	–	•	•

- Sicherheitskritischer Dienst (Safety of Life Service, SOL)
- Öffentlich regulierter Dienst (Public Regulated Service, PRS)
- Such- und Rettungsdienst (Support for Search and Rescue, SAR)

Der offene Dienst richtet sich an den Massenmarkt mit geringeren Genauigkeitsanforderungen im Bereich von 15 m (Einfrequenzempfänger) bzw. 4 m (Zweifrequenzempfänger) in der horizontalen Position. Für die kostenlos nutzbaren Signale gibt es keine Verfügbarkeitsgarantie und keine Integritätsinformationen. Bei höheren Ansprüchen an Genauigkeit und Verfügbarkeit bietet der kommerzielle Dienst Zugriff auf zwei zusätzliche, verschlüsselte Signale und kostenpflichtige Mehrwertdienste (ionosphärische Modelle, differentielle Beobachtungskorrekturen). Der sicherheitskritische Dienst richtet sich an besondere Nutzergruppen beispielsweise im Land-, Schienen- und Luftverkehr, die eine hohe Integrität und garantierte Genauigkeiten benötigen. Der öffentlich regulierte Dienst dient ausschließlich staatlichen Zwecken (Polizei, Zoll), ist durch Verschlüsselung zugriffsgeschützt und gewährleistet eine ständige Verfügbarkeit der Signale. Der Such- und Rettungsdienst wird eine Verbesserung des bestehenden Systems COSPAS-SARSAT darstellen, in dem Notrufsignale auf wenige Meter genau in Echtzeit geortet werden können. Die Verteilung der GALILEO-Dienste auf die Frequenzbänder zeigt Tab. 8.4 (EC 2002).

Geodätische Nutzer werden über den Offenen Dienst (OS) auf die Trägerphasen E5a, E5b und E1/E2 zugreifen. Über die reinen GALILEO-Dienste hinaus wird es lokale Dienste (Local Component Services) für spezielle Anwendungen in räumlich begrenzten Gebieten geben, um höhere Anforderungen an Genauigkeit, Integrität und Verfügbarkeit zu erfüllen. Dazu gehört die Verteilung von Code- und Trägerphasenkorrekturdaten. Da die lokalen Dienste nicht zum GALILEO-Kernsystem gehören und eine zusätzliche lokale Infrastruktur benötigen, besteht hier die Schnittstelle zu Diensten anderer Betreiber, die mit GALILEO kombiniert werden (Schäfer et al. 2003). Beispiele für lokale Komponenten sind SA-POS und LAAS.

#### 8.4.5 Zukünftige Nutzung von GALILEO in GNSS-Referenzstationsdiensten

Mit GALILEO als drittem globalen Satellitennavigationssystem stehen ab 2008 mit 27 GPS- und 30 GALILEO-Satelliten 57 aktive Satelliten für Positionierungsaufgaben zur Verfügung. Weitere 18 GLONASS-Satelliten könnten hinzukommen, wenn die russischen Ankündigungen zum Wiederaufbau von GLONASS tatsächlich umgesetzt werden. Davon sind 8 bis 24 Satelliten (mit GLONASS bis zu 31 Satelliten) gleichzeitig sichtbar, so dass auch in Messumgebungen mit starken Abschattungen mit hoher Wahrscheinlichkeit noch ausreichend viele Satelliten nutzbar sind. Die hohe Redundanz durch die Anzahl der Satelliten und durch die Verwendung von bis zu drei verschiedenen GNSS-Systemen steigert insbesondere die Zuverlässigkeit der Positionsbestimmung.

GALILEO und das modernisierte GPS-System stellen zukünftig mindestens fünf Messsignale jeweils mit Code und Trägerphase zur Verfügung. Aus diesen Beobachtungsgrößen lassen sich zusätzliche Linearkombinationen mit größeren Wellenlängen bilden. Die Verfügbarkeit einer dritten Trägerphase ermöglicht neue Algorithmen zur schnellen und zuverlässigen Mehrdeutigkeitslösung. Simulationen von

Eissfeller (2002) zeigen, dass sich mit kombinierten GPS/GALILEO-Beobachtungen Mehrdeutigkeiten auf kurzen Basislinien schnell und mit hoher Zuverlässigkeit schätzen lassen, mit zunehmenden Abstand, z.B. über 50 km hinaus, jedoch die Zahl der richtigen Lösungen auf unter 5% sinkt. Selbst in abschattungsfreien Umgebungen verhindern trotz der hohen Anzahl an Satelliten ( $> 15$ ) mit entsprechend guter Geometrie ( $PDOP < 1,6$ ) die entfernungsabhängigen atmosphärischen Fehler schnelle und zuverlässige Mehrdeutigkeitslösungen über größere Entfernungen. Die Referenzstationsvernetzung ist deshalb auch mit kombinierten GPS/GALILEO-Beobachtungen unverzichtbar, insbesondere für die Modellierung der ionosphärischen Refraktion.

Die hohe Redundanz in der Anzahl der Satelliten und Beobachtungsgrößen lässt höhere Positionierungsgenauigkeiten über kurze und mittlere Basislinien erwarten. Dies resultiert zum einen aus niedrigeren DOP-Werten in abschattungsfreien Umgebungen und zum anderen aus besseren Möglichkeiten, das Messrauschen zu filtern. Nach den Simulationen von Eissfeller (2002) sind Genauigkeitssteigerungen um den Faktor 10 bei Entfernungen bis 20 km möglich, wobei die Höhenkomponente noch mehr als die Lagekomponente von der hohen Satellitenanzahl profitiert. Über 30 km hinaus ist keine Genauigkeitssteigerung mehr nachweisbar. Unter stärkeren Abschattungsbedingungen, die die Geometrie des räumlichen Bogenschlages mehr oder weniger stark eingeschränken, sind ebenfalls keine Genauigkeitssteigerungen möglich. In diesen Situationen ist jedoch die höhere Verfügbarkeit von Trägerphasenlösungen, wie bereits bei den kombinierten GPS/GLONASS-Lösungen empirisch nachgewiesen, entscheidender als Genauigkeitssteigerungen. Die Ergebnisse werden durch die Untersuchungen von Lachapelle et al. (2002) grundsätzlich bestätigt, auch wenn sich diese nur auf Einfrequenzlösungen beziehen.

Für Genauigkeitsanforderungen unterhalb von 1–2 dm sind die SAPOS-Dienste HEPS und GPPS (Geodätischer Postprocessing Positionierungsservice) auch in Zukunft unverzichtbar. Inwieweit sie als lokale Komponente in GALILEO integriert werden können, muss noch konkretisiert werden. Die im Meterbereich arbeitenden terrestrischen DGPS-Dienste (EPS, RASANT, ALF) werden dagegen mit der Verfügbarkeit der GNSS-2-Systeme theoretisch verzichtbar. In GNSS-2-Systemen wird die Absolutgenauigkeit von GPS, GLONASS und GALILEO durch regionale Augmentationen wie z.B. EGNOS verbessert, indem diese regionale Korrektursignale und Integritätsinformationen über geostationäre Inmarsat-Satelliten ausstrahlen.

Die interoperable Signalstruktur von GALILEO mit GPS erleichtert die Herstellung kombinierter GPS/GALILEO-Empfänger mit mindestens vier Frequenzen. Mit den ersten Geräten wird bereits während der Phase der In-Orbit-Validierung 2005/2006 gerechnet. Sie werden sich an professionelle Nutzer im Bereich der hochpräzisen Anwendungen richten. Aufgrund der Vorteile kombinierter GPS/GALILEO-Lösungen sollten die PDGPS-Dienste mit dem Aufbau des GALILEO-Raumsegmentes 2008 auf kombinierte Empfänger mit mindestens 48 Kanälen, die dann auch über moderne digitale Hardwarekomponenten verfügen, umrüsten. Diese Empfänger sollten auch die neuen Signale des modernisierten GPS-Systems empfangen können, die dann bereits von den Block IIR-M und Block IIF Satelliten ausgestrahlt werden.

Sobald eine ausreichende Anzahl kombinierter Empfänger auf weltweit verteilten Stationen zur Verfügung steht, können die Zusammenhänge zwischen den Raum- und Zeitbezugssystemen der GNSS-Systeme ermittelt werden. Das Genauigkeitsniveau der GALILEO-Ephemeriden ist zu bestimmen. GALILEO wird sicherlich schnell in den IGS-Produktkatalog integriert werden. Für die hochpräzise Antennenkalibrierung ergibt sich ein neues Aufgabenfeld, die Antennenphasenzentren für die verschiedenen GNSS-Signale in einer kombinierten Antenne zu bestimmen.



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Aktive GPS-Referenzstationsnetze ermöglichen durch die Bereitstellung von Trägerphasenkorrekturdaten die präzise Positionsbestimmung in Echtzeit. Die Echtzeitforderung umfasst dabei zwei Aspekte. Zum einen müssen die Korrekturdaten innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne für einen Nutzer verfügbar sein, die abhängig von der zeitlichen Korrelation der GPS-Fehler 1–2 Sekunden nicht überschreiten sollte. Zum anderen ist die kontinuierliche Verfügbarkeit der Korrekturen und damit die permanente Betriebsbereitschaft des Referenzstationsdienstes sicherzustellen. Diese Definition für Echtzeitfähigkeit in Anlehnung an die für Rechnersysteme geltende DIN 44300 ist noch hinsichtlich der räumlichen Verfügbarkeit der Korrekturdaten innerhalb des gesamten Referenznetzes zu erweitern.

Die entfernungsabhängigen Fehler, zu denen Satellitenbahnfehler und Laufzeitverzögerungen bedingt durch die Ionosphäre und Troposphäre zählen, schränken die Reichweite einer einzelnen Referenzstation auf wenige Kilometer ein. Um die hohen Genauigkeitsanforderungen für Landes- und Liegenschaftsvermessungen zu erfüllen, wäre eine so hohe Referenzstationsdichte erforderlich, dass sie keinen wirtschaftlichen Betrieb eines Referenzstationsdienstes zuließe. Eine Vergrößerung der Referenzstationsabstände ist ohne Genauigkeitsverlust nur durch eine Vernetzung der Referenzstationen möglich. Dabei werden die Beobachtungen der vernetzten Referenzstationen in einer Multistationslösung in Echtzeit ausgewertet. Durch Berechnung einer Interpolationsfläche durch die Residuen der Referenzstationen können die entfernungsabhängigen Fehler für jeden Ort innerhalb der Netzmasche prädiziert werden.

Für die Referenzstationsvernetzung wurden verschiedene Ansätze entwickelt, die sich zunächst grundlegend in der Multistationslösung unterscheiden. Diese basiert in den meisten Anwendungen auf der Parameterelimination durch die Bildung von Doppeldifferenzen der GPS-Beobachtungen. Diese Arbeit baut dagegen auf der Parameterschätzung, der Auswertung undifferenzierter Beobachtungen auf, einem Ansatz, der am Institut für Erdmessung von Wübbena (1991) entwickelt wurde und Grundlage vieler weiterer Arbeiten am Institut ist. Weiterhin unterscheiden sich die Vernetzungsansätze hinsichtlich der Schätzung und Repräsentation der entfernungsabhängigen Fehler. Grundlage dieser Arbeit ist das für die unidirektionale Korrekturdatenausstrahlung geeignete FKP-Modell (Wübbena et al. 1996), bei dem die Neigungen einer Interpolationsfläche als Flächenkorrekturparameter (FKP) mit den Trägerphasenkorrekturdaten zu den Nutzern übertragen werden. Ein alternatives Repräsentationsmodell stellt die Virtuelle Referenzstation (VRS) dar, die von Wanninger (2000) eingehend untersucht wurde. Diese und weitere Vernetzungs- und Repräsentationsmodelle werden in der vorliegenden Arbeit diskutiert.

Gegenüber GPS-Messungen für Postprocessingauswertungen bedeuten die Einrichtung und der Betrieb von Referenzstationsnetzen ein Vielfaches an technischem, logistischem und administrativem Aufwand. Damit die Netze universell für alle Anwender mit unterschiedlicher Hard- und Software und für verschiedenste Anwendungen nutzbar sind, ist eine Standardisierung der Korrekturdaten und der Korrekturverfahren notwendig. Für die Datenübertragung im Referenznetz und zu den Nutzern kommen verschiedene Kommunikationstechnologien und -protokolle zum Einsatz. Die Erfüllung der zuvor definierten Echtzeitanforderungen in einem solchen komplexen Gesamtsystem erfordert einen Referenzstationsdienst, der durch ein permanentes Monitoring und Qualitätsmanagement die Integrität sowie räumliche und zeitliche Verfügbarkeit gewährleistet. Der gegenwärtige Stand und die zukünftigen Entwicklungen der Korrekturdatenformate, der Kommunikationslösungen und der Referenzdienste werden eingehend beschrieben. Diese Grundlagen sind eine wichtige Basis der Arbeiten, die zum Aufbau und Betrieb von zwei Referenzstationsvernetzungen in Brasilien geführt haben.

Entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit wurde das Potential der Echtzeit-Referenzstationsvernetzung durch Messungen in der südniedersächsischen Referenzstationsmasche und im Hamburger Referenzstationsnetz untersucht. Dazu gehörte zunächst die Erarbeitung einer effektiven Untersuchungsstrategie. Die Entwicklung eines Verfahrens zur Echtzeitsimulation ermöglichte die Verarbeitung der originären Echt-

zeitdaten mit veränderten Auswerteparametern. Die Simulation unterscheidet sich von realen Messungen insofern, als Fehler durch eine gestörte Datenkommunikation ausgeschaltet sind. Gegenüber einem echten Postprocessing erfolgt die Auswertung auf Basis der RTCM-Korrekturdaten und unmittelbar mit den Vernetzungsalgorithmen, die sich insbesondere hinsichtlich der Mehrdeutigkeitslösungsalgorithmen unterscheiden.

Das Potential der Echtzeitvernetzung kann anhand der Zielgrößen beurteilt werden, die jeder Nutzer bei Vermessungsaufgaben in der Landesvermessung und im Liegenschaftskataster zu erfüllen hat. Dazu gehört eine Lagegenauigkeit von 1 bis maximal 2 cm, eine Beobachtungsdauer von nur wenigen Minuten und eine Zuverlässigkeit, die vergleichbar mit anderen geodätischen Messverfahren über 99% liegen sollte. Diese Werte sind aufgrund der Vernetzung unabhängig von der Entfernung zur nächsten Referenzstation im gesamten Referenznetz zu jeder Zeit zu erfüllen. Für die Beurteilung der Ergebnisse ist es wichtig zu berücksichtigen, dass die drei Zielgrößen bei einer GPS-Auswertung voneinander abhängig sind. Die Forderung nach einer höheren Zuverlässigkeit führt zu einer längeren Beobachtungsdauer, die Auswertung von mehr Beobachtungsmaterial zu einer höheren Genauigkeit. Diese Abhängigkeiten widersprechen allerdings dem Ziel der schnellen und wirtschaftlichen Positionsbestimmung, so dass ein Kompromiss zu finden ist.

Von Beginn der Untersuchungen ab 1998 an war der Vorteil der Vernetzung gegenüber RTK-Lösungen nachweisbar. Allerdings erwies sich die Vernetzung als nicht ganz entfernungsunabhängig. Restfehler von 0,1 bis 0,2 ppm für die Lage waren nachweisbar. Zudem zeigte sich eine Abhängigkeit der zur Mehrdeutigkeitslösung benötigten Zeit (TTFA) von den eingesetzten Funkempfängern und Antennen, deren Empfangseigenschaften sich deutlich voneinander unterscheiden. Auch die Leistung der Feldrechner beeinflusst die Dauer der Mehrdeutigkeitslösung abhängig davon, welchen Anteil der Rechenkapazität die anderen Datenverarbeitungsprozesse beanspruchen. Die Verfügbarkeit von Lösungen hängt nicht zuletzt von der GPS-Empfängerhardware ab, deren Leistungsfähigkeit über den Empfang verrauschter, niedrigstehender Satelliten oder durch Mehrwegeausbreitung gestörter Signale entscheidet. Unter den verfügbaren Lösungen gab es eine Ausreißerquote von 3–5%. Hinzuzurechnen ist der Anteil der nicht erfolgreichen Lösungsversuche, die 15 Minuten und mehr betragen haben einschließlich der Zeiträume, in denen Lösungen nicht konvergieren. Dieser Anteil hängt u.a. von der Qualität des Korrekturdateneingangs und damit von der Entfernung zum Sender und der Geländetopographie ab, aber auch von der Schnelligkeit und der Zuverlässigkeit der Multistationslösungen im Referenznetz. Dieser Anteil kann mit durchschnittlich 10–25% angesetzt werden.

Eine deutliche Beschleunigung und Verbesserung der Positionierungsergebnisse resultiert aus der Einführung kalibrierter Referenzstationsantennen und der Hinzunahme weiterer Stationen in die Vernetzung. Auf die absolute Antennenkalibrierung wie auf die stationsabhängigen Fehler insgesamt wird in dieser Arbeit nicht eingegangen, da sie bereits Gegenstand der Dissertationen von Böder (2002) und Menge (2003) am IfE waren.

Bei den Untersuchungen in Norddeutschland ließen sich entfernungsabhängige Fehler in den RTK-Messungen von maximal 5 ppm in der Lage und 9 ppm in der Höhenkomponente nachweisen. Die beiden geometrischen Komponenten haben dabei den geringeren Anteil an den entfernungsabhängigen Fehlern. Der relative Fehler der Broadcast Ephemeriden ist mit etwa 0,2 ppm anzusetzen, der relative troposphärische Laufzeitfehler mit 0,3–0,6 ppm. Der verbleibende Anteil ist der ionosphärischen Komponente der entfernungsabhängigen Fehler zuzuschreiben. Durch die Vernetzung werden die Fehler praktisch vollständig kompensiert, es verbleibt eine Restsystematik von weniger als 0,1 ppm. Der im Hinblick auf das Maximum des Sonnenzyklus 23 erwartete Anstieg der entfernungsabhängigen Fehler konnte aus den Beobachtungen im niedersächsischen Referenznetz nicht nachgewiesen werden, die Lagefehler der RTK-Messungen blieben bei 2–4 ppm. Die insbesondere im Frühjahr auftretenden ionosphärischen Störungen, die Fehler von über 10 ppm verursachen konnten, haben sich durch eine erhöhte Ausreißerquote und mehrstündige Zeitabschnitte bemerkbar gemacht, in denen Echtzeitlösungen nicht möglich waren.

Auf der Grundlage der Erfahrungen in Norddeutschland wurde im Rahmen zweier Kooperationsprojekte mit der Universidade Federal do Paraná (UFPR) in Curitiba und der Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) in Recife die Methodik und Technologie der Referenzstationsvernetzung nach Brasilien transferiert und auf die vorhandene Infrastruktur adaptiert. Dabei waren besonders die durch die Nähe zum geomagnetischen Äquator bedingten, extremen ionosphärischen Fehlereinflüsse zu berücksichtigen. Auf die Erprobung der Echtzeitpositionierung in verschiedenen Anwendungen wie der Fahrzeugnavigation, topographischen und hydrographischen Vermessungen, Katastermessungen und der Landesvermessung einschließlich präziser Höhenübertragungen wurde besonderer Wert gelegt.

Angelegt wurden jeweils Netzmaschen mit vier Referenzstationen. Die Ausstrahlung der Flächenkorrekturparameter erfolgte im 2-m-Funk, da der gut ausgebaute Mobilfunk erst zu einem späteren Zeitpunkt für die Datenkommunikation ausgerüstet wurde. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass unter den wesentlich stärkeren ionosphärischen Störungen von über 20 ppm eine präzise Echtzeitpositionierung ohne Vernetzung auf kurze Entfernungen von maximal 6 km begrenzt ist. Dabei wachsen die entfernungsabhängigen Fehler nicht linear, sondern überproportional mit der Entfernung. In der Referenzstationsvernetzung in Verbindung mit der stochastischen Modellierung der Restionosphäre auf den Rovern werden dagegen die entfernungsabhängigen Fehler bis auf 0,1–0,2 ppm kompensiert. Mit Vernetzung erfolgen 80% der Mehrdeutigkeitslösungen in weniger als 5 Minuten, ohne Vernetzung benötigen umgekehrt 80% der Mehrdeutigkeitslösungen zwischen 5 bis 15 Minuten.

Mit der Referenzstationsvernetzung erreichen 90% der Positionierungsergebnisse eine Lagegenauigkeit von besser als 2 cm. In der Höhenkomponente erreichen 55% der Echtzeitlösungen eine Genauigkeit von unter 2 cm. Nur etwa 1% der Lösungen müssen als Ausreißer verworfen werden, 20% benötigen dagegen über 15 Minuten. Die Zeit, in denen Mehrdeutigkeitslösungen sehr lange dauern bzw. scheitern, ist hauptsächlich von den mit dem Sonnenuntergang verbundenen hohen Gradienten des Elektronengehaltes der Ionosphäre abhängig. Mit Änderungsraten von 5 TEC/min verlieren die Empfänger häufig die GPS-Signale und an der hohen Anzahl an Phasensprüngen scheitert dann die Multistationslösung. Der für den GPS-Signalempfang kritische Zeitraum beginnt nach Sonnenuntergang gegen 18 Uhr Ortzeit und beginnt nach Mitternacht sich wieder zu normalisieren. Dieser auch aus anderen Untersuchungen bekannte Störeffekt macht die kontinuierliche Verfügbarkeit der Referenzstationsvernetzung in Brasilien unmöglich, die ansonsten problemlos gegeben ist.

Mit dem Nachweis, dass auch unter dem Einfluss des geomagnetischen Äquators eine Echtzeit-Referenzstationsvernetzung grundsätzlich möglich ist, stellen die Untersuchungen eine wichtige Grundlage für zukünftige Forschungen zu Referenzstationsdiensten in Brasilien dar. Die bisherigen geodätischen Arbeiten beschränken sich auf die Einrichtung einer aktiven Referenzstation und eines mit RDS arbeitenden DGPS-Korrekturdatensenders (Saatkamp 2003). Verhandlungen mit Mobilfunknetzbetreibern wurden aufgenommen. Allerdings zeigen die Untersuchungen auch die Grenzen auf, im Rahmen universitärer Forschungsprojekte Referenzstationsdienste aufzubauen und zu betreiben. Aufgrund des hohen technischen und logistischen Aufwandes ist eine Kooperation mit der Landesvermessung, hier dem Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), unumgänglich und die Partnerschaft mit einem Telekommunikationsunternehmen zu empfehlen.

Nachdem die Grundlagen der Multistationslösungen und der präzisen differentiellen GPS-Positionierung vorgestellt, verschiedene Vernetzungsmodelle diskutiert und die Grundlagen eines Referenznetzdienstes erarbeitet wurden, konnte die Eignung der präzisen Echtzeitpositionierung in Referenznetzen in Norddeutschland und Brasilien für Vermessungsanwendungen verifiziert werden, soweit es die Genauigkeit und die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens betrifft. Hinsichtlich der Zuverlässigkeit und der Verfügbarkeit der Echtzeitpositionierung besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

Gegenwärtig werden PDGPS-Netze parallel nebeneinander entwickelt, ohne die aus der großen Anzahl an Referenzstationen entstehende Redundanz für qualitative Verbesserungen zu nutzen. Die SAPOS-Netze der Bundesländer mit insgesamt über 250 Stationen sind dafür ein Beispiel. Auch existieren aktive

GPS-Referenznetze unterschiedlicher Hierarchieebenen nebeneinander, ohne die Beobachtungen in eine gemeinsame Multistationsauswertung einfließen zu lassen. Für die Zukunft ist eine sowohl horizontale als auch vertikale Integration der verschiedenen Netze anzustreben. Die Integration wird eine Optimierung der Referenzstationsdichte mit größeren Referenzstationsabständen als gegenwärtig üblich ermöglichen. Grundlage dieser Weiterentwicklungen ist die Zustandsmodellierung der GPS-Fehler in einem dynamischen Kalman-Filter. Eine noch notwendige und keineswegs leicht zu erreichende Standardisierung der Fehlermodelle ist dann Voraussetzung zur Übertragung des Fehlervektors an die Nutzer, die die entfernungsabhängigen Fehler für ihren Standort nicht mehr aus einer Interpolationsfläche ableiten, sondern direkt aus den Fehlermodellen. In Brasilien wird eine hierarchische Integration einzelner regionaler Referenznetze in das landesweite RBMC-Netz auf der Basis der Zustandsmodellierung zu einer besseren Schätzung der großräumigen GPS-Fehler führen. Angestrebt wird dabei auch die Übergabe einzelner, im übergeordneten Netz bereits geschätzter Parameter einschließlich ganzzahliger Mehrdeutigkeitsterme an die kleinräumigen Netze, die dann bspw. für aufgehende Satelliten frühzeitiger Zustandskorrekturen bereitstellen können.

Eine zweite Möglichkeit, die Redundanz in der Echtzeitvernetzung zu erhöhen, besteht in der Integration weiterer Satellitennavigationssysteme. Derzeit steht dazu neben GPS nur GLONASS zur Verfügung, dessen vollständiger Ausbau allerdings erst wieder für 2011 angekündigt ist. Ergänzt werden die beiden GNSS ab 2008 durch das europäische GALILEO, dessen Signale gleichermaßen für Vermessungsaufgaben nutzbar sein werden. Die neue Signalstruktur des modernisierten GPS-Systems wird ab etwa 2014 voll einsatzbereit sein. Durch die Integration der Navigationssysteme erhöht sich die Anzahl der für die Positionsbestimmung gleichzeitig verfügbaren Satelliten, selbst bei größeren Abschattungen bleiben genügend Satelliten sichtbar. Untersuchungen mit kombinierten GPS/GLONASS-RTK-Systemen haben gezeigt, dass selbst bei Abschattungen von bis zu 50% Lösungen ohne Einschränkungen der Genauigkeit, Schnelligkeit oder Zuverlässigkeit möglich sind. Demgegenüber erwiesen sich bereits Abschattungen von 20% für reine GPS-Lösungen als kritisch. Eine Genauigkeitssteigerung ist durch die Systemintegration nicht zu erwarten, da alle Messsignale zum einen über eine vergleichbare Auflösung verfügen und zum anderen in benachbarten Frequenzbändern liegend auch vergleichbaren Fehlereinflüssen unterliegen. Die für die Integration der PDGPS-Netze empfohlene Zustandsmodellierung stellt auch für die GNSS-Integration eine optimale Grundlage dar, um die Signale auf den unterschiedlichen Frequenzen, die vielen verschiedenen Uhrfehler und Laufzeitverzögerungen in der Hardware und sonstigen Fehler modellieren zu können. Bis zum Maximum des nächsten Sonnenzyklus 24 bleibt ausreichend Zeit, die Auswertalgorithmen und Infrastruktur der Referenzdienste den neuen oder erneuerten Satellitennavigationssystemen anzupassen.

# Literaturverzeichnis

## Häufig verwendete Abkürzungen:

Bull. Géod.	Bulletin Géodésique, Springer, Berlin
DGK	Veröffentlichungen der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München
FuB	Flächenmanagement und Bodenordnung, Luchterhand, Neuwied
ION GPS/GNSS	Proceedings of the International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation
ION NTM	Proceedings of the National Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation
JG	Journal of Geodesy, Springer, Berlin
JGR	Journal of Geophysical Research, American Geophysical Union, Washington D.C.
KIS	Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff
KOM	Mitteilung der Europäischen Kommission
Mitt. BKG	Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie
Navigation	Journal of the Institute of Navigation
NaVKV	Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung
UCGE Report	Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada
UNB Techn.Rep.	Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Canada
UniBW	Schriftenreihe Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
UNISURV	School of Geomatic Engineering, University of New South Wales, Australia
Wiss. Arb. Univ. Hannover	Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover
ZfV	Zeitschrift für Vermessungswesen, Wißner, Augsburg

Abdel-Salam, M., Gao, Y. (2003): *Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning: Preliminary Results*. ION GPS/GNSS 2003: 1222–1228.

AdV (1998): *Bericht der Expertengruppe GPS-Referenzstationen im Arbeitskreis Grundlagenvermessung*. <http://www.sapos.de>.

AdV (2002): *Marksteine zu SAPOS - Auszug aus dem Ergebnisbericht*. Bericht der Expertengruppe GPS-Referenzstationen im Arbeitskreis Raumbezug, 4. SAPOS-Symposium, Hannover.

AdV (2004): *SAPOS: Ergebnisbericht der Expertengruppe GPS-Referenzstationen im Arbeitskreis Raumbezug einschließlich weiterer Entwicklungen*. <http://www.sapos.de>.

Alex, N., Willgalis, S. (1996): *Determination of Crustal Deformation Processes in South-West Iceland - Results of the 1995 Campaign*. XXV General Assembly, European Seismological Commission (ESG), Reykjavik, Iceland, 9.-14. Sept. 1996.

Alex, W., Bernör, G. (1994): *UNIX, C und INTERNET*. Springer, Berlin.

Allison, T., Griffin, P., Talbot, N. (1994): *Acceptance of Real-Time Kinematic by the Professional Surveyor*. ION GPS 94: 329–337.

- Allport, C. (1999): *Untersuchung von Zweifrequenz-GPS/GLONASS-Empfängern für präzise Echtzeitvermessungen im Stadtgebiet Hamburg*. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Institut für Erdmessung, Universität Hannover.
- Atherton, D., Borne, P. (Hrsg.) (1992): *Concise Encyclopedia of Modelling & Simulation*. Pergamon Press, Oxford.
- Augath, W. (1994): *Stand und Entwicklungstendenzen des GPS-Einsatzes in der Landesvermessung*. ZfV 119 (5): 233–240.
- Bagge, A. (2001): *DGPS Datenformate 2.0*. Geo++ GmbH, Garbsen.
- Bekkers, R. (2001): *Mobile telecommunications standards: GSM, UMTS, TETRA, and ERMES*. Artech House, Boston.
- Beutler, G., Hein, G., Melbourne, W., Seeber, G. (Hrsg.) (1996): *GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne, and Spaceborne Applications*. General Assembly IUGG, Boulder, Colorado, 1995. IAG-Symp. 115. Springer, Berlin.
- Beutler, G., Schaer, S., Rothacher, M. (1999): *Wide Area Differential GPS. Study in the Context of AGNES*. Printing Office, University of Bern.
- Bisnath, S., Langley, R. (2002): *CHAMP Orbit Determination with GPS Phase-Connected, Precise Point Positioning*. In: Reigber C., H. Lühr, P. Schwintzer (Hrsg.): *First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies*, Springer, Heidelberg: 59–64.
- Blomenhofer, E. (1997): *Measurement Corrections versus Raw Data for Precise DGNSS Real-Time Positioning*. In: DGON (Hrsg.): *First European Symp. on Global Navigation Satellite Systems (GNSS 97)*, München, 21.-25. April 1997.
- Blomenhofer, E., Hein, G. (1993): *Investigations on Carrier Phase Corrections for High-Precision DGPS Navigation*. ION GPS 93: 1461–1468.
- Böder, V. (1999): *Kalibrierung von GPS-Referenzstationen*. 2. SAPOS-Symposium, Berlin: 59–67.
- Böder, V. (2002): *Zur hochpräzisen GPS Positions- und Lagebestimmung unter besonderer Berücksichtigung mariner Anwendungen*. Wiss. Arb. Universität Hannover, Nr. 245.
- Brammer, K., Siffling, G. (1975): *KALMAN-BUCY-Filter: Deterministische Beobachtung und stochastische Filterung*. Oldenbourg, München.
- Bronstein, I., Semendjajew, K. (1989): *Taschenbuch der Mathematik*. Grosche, G., Ziegler, V. (Hrsg.). 24. Aufl., Deutsch, Thun.
- Brown, A. (1989): *Extended Differential GPS*. Navigation 36 (3): 107–127 (Red Books IV).
- Brown, R. G., Hwang, P. Y. C. (1997): *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*. John Wiley & Sons, New York.
- CODE (2005): *Evolution of the Earth's mean TEC past January 1, 1995*. Center for Orbit Determination in Europe, The Astronomical Institute of the University of Berne (AIUB).
- CORS (1999): *National Geodetic Survey CORS System: Station Selection Criteria*. [http://www.ngs.nasa.gov/CORS/Site\\_selec\\_crit.html](http://www.ngs.nasa.gov/CORS/Site_selec_crit.html).
- Counselman, C., Shapiro, I. (1979): *Miniature interferometer terminals for earth surveying*. Bull. Géod. 53 (2): 139ff.
- Dai, L., Han, S., Wang, J., Rizos, C. (2003): *Comparison of interpolation algorithms in network-based GPS techniques*. Navigation 50 (4): 277–293.
- Dettmering, D. (2003): *DGNSS über Internet und Mobilfunk: Der EUREF Ntrip-Broadcaster*. 5. SAPOS-Symposium, Frankfurt a.M.: 72–78.

- Dilßner, F. (1999): *Transformation von GPS-Messungen in die amtlichen Bezugssysteme bei der Nutzung von RTK-GPS und SAPOS-Diensten*. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Institut für Erdmessung, Universität Hannover.
- Dilßner, F., Seeber, G., Feldmann, U., Wuebbena, G., Schmitz, M., Bachmann, M. (2004): *Absolute Field Calibration of Carrier Phase Multipath*. Poster, IGS Workshop, Bern.
- Draken, W. (1996): *Einsatz des Real-Time-Kinematik-Verfahrens zur Bestimmung von Aufnahmepunkten und bei Liegenschaftsvermessungen*. NaVKV 46 (4): 186–194.
- Draken, W. (2005): *Funktion und Nutzung des SAPOS-Deutschland-Netzes*. FuB 67 (1): 21–32.
- Duque-Antón, M. (2002): *Mobilfunknetze: Grundlagen, Dienste und Protokolle*. Vieweg, Braunschweig.
- EC (1999): *GALILEO Involving Europe in a New Generation of Satellite Navigation Services*. Europäische Kommission, KOM(1999) 54 v. 09.02.1999, Brüssel.
- EC (2002): *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat: Derzeitiger Stand des GALILEO-Programms*. Europäische Kommission, KOM(2002) 518 v. 15.10.2002, Brüssel.
- EC (2004): *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat: Stand der Durchführung des Forschungsprogramms GALILEO zu Beginn des Jahres 2004*. Europäische Kommission, KOM(2004) 112 v. 18.02.2004, Brüssel.
- EC (2005): *GALILEO - Europäisches Satellitennavigationssystem*. Europäische Kommission, Generaldirektion Energie und Verkehr, Brüssel, [http://europa.eu.int/comm/dgs/energy\\_transport/galileo/index\\_de.htm](http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/index_de.htm).
- Eissfeller, B. (2002): *Das Europäische Satellitennavigationssystem GALILEO*. 4. SAPOS-Symposium, Hannover: 214–226.
- Euler, H.-J., Keenan, C., Zebhauser, B., Wübbena, G. (2001): *Study of a Simplified Approach Utilizing Information from Permanent Station Arrays*. ION GPS 2001: 379–391.
- Euler, H.-J., Seeger, S., Zelzer, O., Takac, F., Zebhauser, B. (2004): *Improvement of Positioning Performance Using Standardized Network RTK Messages*. ION NTM 2004: 453–461.
- Euler, H.-J., Zelzer, O., Takac, F., Zebhauser, B. (2003): *Applicability of Standardized Network RTK Message for Surveying Rovers*. ION GPS/GNSS 2003: 1361–1369.
- Euler, H.-J., Ziegler, C. (2000): *Advances in Ambiguity Resolution for Surveying Type Applications*. ION GPS 2000: 95–103.
- Föllinger, O., Franke, D. (1982): *Einführung in die Zustandsbeschreibung dynamischer Systeme*. Oldenbourg, München.
- Flügel, M. (1998): *Untersuchung kombinierter GPS/GLONASS-Messungen für präzise Echtzeitanwendungen*. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Institut für Erdmessung, Universität Hannover.
- Fortes, L. (2002): *Optimising the Use of GPS Multi-Reference Stations for Kinematic Positioning*. UCGE Report 20158 (Ph.D. Thesis), The University of Calgary.
- Fortes, L., Cannon, M., Lachapelle, G. (2000): *Testing a Multi-Reference GPS Station Network for OTF Positioning in Brazil*. ION GPS 2000: 1133–1142.
- Fotopoulos, G. (2000): *Parameterization of DGPS Carrier Phase Errors Over a Regional Network of Reference Stations*. UCGE Report 20142 (M.Sc. Thesis), The University of Calgary.
- Fröhlich, M. (1995): *Zur Entwicklung eines Hochpräzisen Permanenten Positionierungsservice (HPPS)*. Wiss. Arb. Universität Hannover, Nr. 211.
- FRP (2001): *Federal Radionavigation Plan*. U.S. Departments of Defense and Transportation, Washington, DC, <http://www.navcen.uscg.gov/pubs/frp2001>.

- Galas, R., Köhler (2001): *A Binary Exchange Format for GPS Data*. IGS Network Workshop 2000, Oslo, Norway.
- Gao, Y., Li, Z., McLellan, J. (1997): *Carrier Phase Based Regional Area Differential GPS for Decimeter-Level Positioning and Navigation*. ION GPS 97: 1305–1313.
- Gebhard, H. (2003): *Nutzung der Internet-Radio-Technologie zur Übertragung von GNSS-Daten*. 5. SAPOS-Symposium, Frankfurt a.M.: 67–71.
- Gebhard, H., Weber, G. (2003): *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) - Design - Protocols - Software*. RTCM Paper 167-203/SC104-315, Juni 2003.
- Gelb, A. (Hrsg.) (1974): *Applied Optimal Estimation*. M.I.T. Press, Cambridge Mass.
- GLONASS-ICD (2002): *GLONASS Interface Control Document*. Coordinational Scientific Information Center, Russian Federation Ministry of Defense, Moskau. Version 5.0.
- Goad, C. (Hrsg.) (1985): *Proc. of the First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System*. April 15-19, Vol. I and II, Rockville Md.
- Gore, A. (1998): *Vice President Gore Announces Second Civil Signal Decision*. The White House, Washington D.C., 30.03.1998.
- Gore, A. (1999): *Vice President Gore Announces New Global Positioning System Modernization Initiative*. The White House, Washington D.C., 25.01.1999.
- GPS-SPS-PS (2001): *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard*. Assistant Secretary of Defense for Command, Control, Communications, and Intelligence, 10/2001.
- Grant, D., Rizos, C., Stolz, A. (1990): *Dealing with GPS biases: some theoretical and software considerations*. In: Rizos, C. (Hrsg.): *Contributions to GPS studies*. UNISURV S-38, University of New South Wales.
- Gurtner, W. (2000): *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.10*. <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/>.
- Habrigh, H. (2000): *Geodetic Applications of the Global Navigation Satellite System (GLONASS) and of GLONASS/GPS Combinations*. Mitt. BKG, Bd. 15, Frankfurt a.M.
- Han, S. (1997): *Carrier Phase-Based Long-Range GPS Kinematic Positioning*. UNISURV S-49, School of Geomatic Engineering, University of New South Wales.
- Han, S., Rizos, C. (1996): *GPS Network Design and Error Mitigation for Real-Time Continuous Array Monitoring System*. ION GPS 96: 1827–1836.
- Hankemeier, P. (1995): *DGPS-Dienste der Vermessungsverwaltungen*. Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation (SPN) 4 (3): 80–88.
- Hatanaka, Y. (1998): *RINEX file compression program for UNIX/MS-DOS/VAX system: convert the RINEX format to Compact RINEX format*. <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/software/rnxcmpl/>.
- Hatch, R., Sharpe, T., Galyean, P. (2001): *StarFire: A Global High Accuracy Differential GPS System*. [www.navcomtech.com/docs/StarFireGlobalHighAccuracySystem.pdf](http://www.navcomtech.com/docs/StarFireGlobalHighAccuracySystem.pdf).
- Hay, C. (2000): *The GPS Accuracy Improvement Initiative*. GPS World Innovation, 6: 56–61.
- Heimberg, F. (1994): *Untersuchungen zum operationellen Einsatz des Differential GPS*. Wiss. Arb. Universität Hannover, Nr. 202.
- Hein, G., Godet, J., Issler, J.-L., Martin, J.-C., Erhard, P., Rodriguez, R., Pratt, T. (2002): *Status of Galileo Frequency and Signal Design*. ION GPS 2002: 266–277.



- Heunecke, O., Pelzer, H., Pfeufer, A., Willgalis, S. (1993): *Comparative Investigations of Dynamic Deformation Models*. 7th FIG-Symposium on Deformation Measurements, Banff, 310–321.
- Höpcke, W. (1980): *Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung*. Walter de Gruyter, Berlin.
- Hu, G., Khoo, H., Goh, P., Law, C. (2003): *Development and assessment of GPS virtual reference stations for RTK positioning*. Journal of Geodesy 77: 292–302. Springer, Berlin.
- ICD-GPS-200C (2000): *Interface Control Document - NAVSTAR GPS Space Segment / Navigation User Interfaces, Revision C*. ARINC Research Corporation, El Segundo, CA, <http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/icd200/default.htm>.
- Jahn, C.-H. (1996): *Präzise 'near-online' Bestimmung in der Landesvermessung mit Hilfe eines Netzes permanent messender GPS-Empfänger auf Referenzstationen*. Schlussbericht HPPS. Niedersächsisches Landesverwaltungsamt, Abt. Landesvermessung, Hannover.
- Jahn, C.-H., Ballmann, T., Feldmann-Westendorff, U. (2001): *SAPOS-Vernetzungstest 2001 - auf dem Weg in den Regelbetrieb*. NaVKV 51 (4): 7–17.
- de Jonge, P. (1998): *A processing strategy for the application of the GPS in networks*. Netherlands Geodetic Commission. Publications in Geodesy, No. 46, Delft.
- Kalafus, R. (1996): *New RTCM SC-104 Standard for Differential GNSS*. Navigation 43, 4: 363–373.
- Kalafus, R., van Dierendonck, K. (2003): *The New RTCM SC-104 Standard for Differential and RTK GNSS Broadcasts*. ION GPS/GNSS 2003: 741–747.
- Kee, C. (1996): *Wide Area Differential GPS*. In: Parkinson, Spilker, Hrsg. (1996), Bd. 2, Kap. 3: 81–115.
- Kewes, M. (2001): *Analyse eines lokalen GPS-Referenznetzes in Recife, Brasilien, für präzise Echtzeitanwendungen*. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Institut für Erdmessung, Universität Hannover.
- King, R., Masters, R., Rizos, C., Stolz, A. (1987): *Surveying with GPS*. University of New South Wales, Australia 1985, Verlag F. Dümmler Bonn.
- Klug, C., Weber, R. (2003): *GNSS-Permanentstationsnetze der Energieversorger zur Echtzeitpositionierung in Österreich*. 5. SAPOS-Symposium, Frankfurt a.M.: 48–55.
- Kouba, J., Héroux, P. (2001): *Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products*. GPS Solutions (5) 2: 12–28.
- Krakiwsky, E. (1992): *The Method of Least Squares: A Synthesis of Advances*. UCGE Report 10003, The University of Calgary.
- Krueger, C., Souza, E., Romão, V., Willgalis, S., Seeber, G. (2001a): *Time Investigations in the Mel Island using Precise Real Time Positioning in Curitiba, Brazil*. ION GPS 2001.
- Krueger, C., Souza, E., Willgalis, S., Seeber, G., Romão, V. (2001b): *Análise da qualidade do posicionamento de um veículo com o DGPS preciso e o GNREF/GNNET*. Série em Ciências Geodésicas, Brasil, V-1: 82–98.
- Lachapelle, G., Alves, P., Fortes, L., Cannon, M., Townsend, B. (2000): *DGPS RTK Positioning Using a Reference Network*. ION GPS 2000: 1165–1171.
- Lachapelle, G., Cannon, M., O' Keefe, K., Alves, P. (2002): *How will Galileo Improve Positioning Performance?* GPS World 13 (9): 38–48.
- Landau, H. (1990): *Precise GPS positioning with the multistation-multisession software TOPAS*. In: GPS for Geodesy and Geodynamics, Luxembourg: 61–68.
- Landau, H. (1998): *Zur Qualitätssicherung und Vernetzung von GPS-Referenzstationen*. Vermessungswesen und Raumordnung 60 (8): 438–445.

- Landau, H., Vollath, U., Chen, X. (2003a): *Orthogonale dezentralisierte Kalman-Filter bei der Vernetzung von GNSS-Referenzstationen*. 5. SAPOS-Symposium, Frankfurt a.M.: 113–123.
- Landau, H., Vollath, U., Chen, X. (2003b): *Virtual Reference Stations versus Broadcast Solutions in Network RTK – Advantages and Limitations*. The European Navigation Conference GNSS 2003, Graz.
- Langley, R. (1994): *RTCM SC-104 DGPS Standards*. GPS World, 5: 48–53.
- Langley, R. (1998): *RTK GPS*. GPS World, 9: 70–76.
- Large, P., Goddard, D., Landau, H. (2001): *eRTK: A New Generation of Solutions for Centimeter-Accurate Wide-Area Real-Time Positioning*. Trimble Publication.
- Leick, A. (1995): *GPS satellite surveying*. John Wiley, New York.
- Lindlohr, W., Wells, D. (1985): *GPS design using undifferenced carrier beat phase*. Manuscripta Geodaetica, 10, 4: 255–295.
- Loef, P. (2003): *Echtzeitpositionierung mit ascos*. 5. SAPOS-Symposium, Frankfurt a.M.: 31–47.
- Loomis, P., Sheynblatt, L., Mueller, T. (1991): *Differential GPS Network Design*. ION GPS 91: 511–520.
- van der Marel, H. (1998): *Virtual GPS reference stations in The Netherlands*. ION GPS 98: 49–58.
- Martin, S., Jahn, C.-H. (1998): *High Precision Real-Time Differential Correction Network for Geodetic Applications*. ION GPS 98: 23–30.
- McDonald, K. (2002): *The Modernization of GPS: Plans, New Capabilities and the Future Relationship to Galileo*. Journal of Global Positioning Systems (JGPS) 1 (1): 1–17.
- Menge, F. (2003): *Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung*. Wiss. Arb. Universität Hannover, Nr. 247.
- Moritz, H. (1980): *Advanced Physical Geodesy*. H. Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- Mueller, T. (1994): *Wide Area Differential GPS*. GPS World 5 (6): 36–44.
- Muellerschoen, R., Bar-Sever, Y., Bertiger, W., Stowers, D. (2001): *NASA's Global DGPS for High-Precision Users*. GPS World 12 (1): 14–20.
- Müller, A., Lechner, W., Baumann, S. (1997): *Satellitenpositionierungssysteme – Sachstand und Perspektiven 1998*. In: Seeger, Riedl (1999): 10–23.
- Parkinson, B., Spilker, J., Hrsg. (1996): *Global Positioning System: Theory and Applications*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington D.C.
- PCC (1996): *RFM96 User's Guide*. Pacific Crest Corporation: 11–15.
- Raquet, J. (1998): *Development of a Method for Kinematic GPS Carrier-Phase Ambiguity Resolution Using Multiple Reference Receivers*. UCGE Report 20116 (Ph.D. Thesis), The University of Calgary.
- Raquet, J., Lachapelle, G. (2001): *RTK Positioning with Multiple Reference Stations*. GPS World 12 (4): 48–53.
- Rizos, C., Han, S. (2003): *Reference Station Network Based RTK Systems - Concepts and Progress*. Wuhan University Journal of Nature Sciences, 8(2B): 566–574.
- Roßbach, U. (2001): *Positioning and Navigation Using the Russian Satellite System GLONASS*. Schriftenreihe UniBW, 70, München.
- Rothacher, M., Mervart, L. (1996): *Bernese GPS Software, Vers. 4.0*. Printing Office, University of Bern.

- RTCM (2001): *RTCM Recommended Standards for Differential GNSS Service, Vers. 2.3*. RTCM Paper 136-2001/SC104-STD.
- RTCM (2004a): *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip), Vers. 1.0*. RTCM Paper 200-2004/SC104-STD.
- RTCM (2004b): *RTCM Recommended Standards for Differential GNSS Service, Vers. 3.0*. RTCM Paper 30-2004/SC104-STD.
- Saatkamp, E. (2003): *Desenvolvimento e experimentação de um formato para a transmissão de correções DGPS pelo RDS no Brasil*. Dissertation, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Schaer, S., Beutler, G., Rothacher, M., Brockmann, E., Widet, A., Wild, U. (2000): *The impact of the atmosphere and other systematic errors on permanent GPS networks*. In: Schwarz (2000).
- Schäfer, C., Schmitz-Pfeiffer, A., Weber, T. (2003): *Lokale Komponenten für Satellitennavigation – SAPOS und Galileo*. 5. SAPOS-Symposium, Frankfurt a.M.: 56–66.
- Schrack, K.-W. (Hrsg.) (1977): *Anwendungen der KALMAN-Filtertechnik – Anleitungen und Beispiele*. Oldenbourg, München.
- Schwarz, K. (Hrsg.) (2000): *Geodesy Beyond 2000 – The Challenges of the First Decade*. IAG-Symp. Proc. 121, Springer, Berlin.
- Seeber, G. (2003): *Satellite Geodesy. Foundations, Methods, and Applications*. Walter de Gruyter, Berlin.
- Seeger, H., Riedl, G. (Hrsg.) (1999): *GPS Praxis und Trends '97*. 46. DVW-Seminar, 29.9.-1.10.1997 Frankfurt a.M., DVW-Schriftenreihe Bd. 35. Wittwer, Stuttgart.
- SIDC (2005): *Sunspot index graphics*. Solar Influences Data analysis Center at the Royal Observatory of Belgium.
- SISNeT (2003): *Signal-in-Space through the Internet*. ESA <http://esamultimedia.esa.int/docs/egnos/estb/sisnet/sisnet.htm>.
- Slater, J. (2004): *Summary of some of Russia's plans for the GLONASS constellation*. IGS Electronic Mail, Message Number 5063, 13. Dez 2004.
- Slater, J., Noll, C., Gowey, K. (Hrsg.) (1999): *International GLONASS Experiment IGEX-98*. Proc. IGEX-98 Workshop, IGS Central Bureau.
- Souza, E., Krueger, C. (2002): *Determinação das Variações Volumétricas Ocorridas no Istmo da Ilha do Mel Utilizando o GPS*. Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário (COBRAC), UFSC Florianópolis, [http://geodesia.ufsc.br/geodesia-online/arquivo/Cobrac\\_2002/052/052.htm](http://geodesia.ufsc.br/geodesia-online/arquivo/Cobrac_2002/052/052.htm).
- Strinz (1925): *Koordinatenumformung mit graphischer Ausgleichung*. ZfV 50: 289–300.
- Sun, H., Cannon, M., Melgård, T. (1999): *Real-Time GPS Reference Network Carrier Phase Ambiguity Resolution*. ION NTM 99: 193ff.
- Talbot, N. (1996): *Compact Data Transmission Standard for High-Precision GPS*. ION GPS 96: 861–871.
- Teuber, A. (1996): *Untersuchungen zur Reduzierung entfernungsabhängiger Fehleranteile durch Vernetzung von Referenzstationen für PDGPS-Echtzeitanwendungen*. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Universität Hannover.
- Teunissen, P., Joosten, P., Tiberius, C. (2002): *A Comparison of TCAR, CIR and LAMBDA GNSS Ambiguity Resolution*. ION GPS 2002: 2799–2808.
- Teunissen, P. J. G., Kleusberg, A. (1998): *GPS for Geodesy*. Springer, Berlin.
- Torge, W. (2003): *Geodäsie*. Walter de Gruyter, Berlin.

- Townsend, B., van Dierendonck, K., Neumann, J., Petrovski, I., Kawaguchi, S., Torimoto, H. (2000): *A Proposal for Standardized Network RTK Messages*. ION GPS 2000: 1871–1878.
- Townsend, B., Jensen, A. (2001): *Using a Virtual Reference Station to Compensate for Coordinate Transformations in GPS Surveying*. Proceed. KIS 2001, Banff: 446–454.
- Townsend, B., Lachapelle, G., Fortes, L., Melgård, T., Nørbech, T., Raquet, J. (1999): *New Concepts for a Carrier Phase Based GPS Positioning Using a National Reference Station Network*. ION NTM 99: 319ff.
- Vaníček, P., Wells, D., Chrzanowski, A., Hamilton, A., Langley, R., McLaughlin, J., Nickerson, B. (1983): *The future of geodetic networks*. Proceed. IAG-Symp., General Assembly Hamburg, Bd. 2: 372–379.
- Varner, C. (2000): *DGPS Carrier Phase Networks and Partial Derivative Algorithms*. UCGE Report 20129 (Ph.D. Thesis), The University of Calgary.
- Völksen, C. (2000): *Die Nutzung von GPS für die Deformationsanalyse in regionalen Netzen am Beispiel Islands*. Wiss. Arb. Universität Hannover, Nr. 237.
- Vollath, U., Buecherl, A., Landau, H. (2000a): *Long-Range RTK Positioning Using Virtual Reference Stations*. ION GPS 2000: 1143–1147.
- Vollath, U., Buecherl, A., Landau, H., Pagels, C., Wagner, B. (2000b): *Multi-Base RTK Positioning Using Virtual Reference Stations*. ION GPS 2000: 123–131.
- Walsh, D., Daly, P. (1996): *GPS and GLONASS Carrier Phase Ambiguity Resolution*. ION GPS 96: 899–907.
- Wanninger, L. (1993): *Effects of the Equatorial Ionosphere on GPS*. GPS World 4: 48–54.
- Wanninger, L. (1995): *Improved Ambiguity Resolution by Regional Differential Modelling of the Ionosphere*. ION GPS 95, 55–62.
- Wanninger, L. (1996a): *Fehlermodellierung in regionalen Referenzstationsnetzen*. 41. DVW-Fortbildungsseminar: GPS-Anwendungen und Ergebnisse '96, Potsdam, DVW-Schriftenreihe Bd. 28, 206–218.
- Wanninger, L. (1996b): *Präzise GPS-Positionierung in regionalen Netzen permanenter Referenzstationen*. ZfV 121 (9): 441–454.
- Wanninger, L. (1997): *Virtuelle Referenzstationen in regionalen GPS-Netzen*. In: Seeger, Riedl (1999).
- Wanninger, L. (2000): *Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen*. DGK, C 508, München.
- Wanninger, L. (2002a): *Die Bedeutung der Ionosphäre für Referenzstationsnetze*. 4. SAPOS-Symposium, Hannover: 132–138.
- Wanninger, L. (2002b): *Virtual Reference Stations for Centimeter-Level Kinematic Positioning*. ION GPS 2002: 1400–1407.
- Weber, L., Tiwari, A. (1995): *DGPS Architecture Based on Separating Error Components. Virtual Reference Stations, and FM Subcarrier Broadcast*. ION GPS 95: 191–200.
- Webster, I., Kleusberg, A. (1992): *Regional modelling of the ionosphere for single frequency users of the Global Positioning System*. Proceed. 6th Int. Symp. Satellite Positioning, Columbus, Ohio, Bd. 1: 230–239.
- Wells, D., Beck, N., Delikaraoglou, D., Kleusberg, A., Krakiwsky, E., Lachapelle, G., Langley, R., Nankiboglu, M., Schwarz, K., Tranquilla, J., Vaníček, P. (1986): *Guide to GPS Positioning*. Fredericton N.B., Canada.

- White House (2000): *Statement by the President Regarding the United States Decision to Stop Degrading Global Positioning System Accuracy*. The White House, Washington D.C., 01.05.2000.
- Willgalis, S., Jahn, C.-H. (1999): *Precise Real Time Positioning in Regional GPS Reference Station Networks under the Influence of Increasing Ionospheric Activities*. Poster, IUGG-Konferenz Birmingham.
- Willgalis, S., Seeber, G., Krueger, C., Romão, V. (2002): *A Real Time GPS Reference Network for Recife, Brazil, Enabling Precise and Reliable Cadastral Surveys*. TS 5.8, FIG XXII International Congress, Washington D.C. USA.
- Willgalis, S., Seeber, G., Menge, F., Krueger, C., Romão, V. (2001): *Implementation of a GPS Reference Network for Precise Real Time Positioning in Recife, Brazil*. ION GPS 2001: 1071–1078.
- Withhead, M., Penno, G., Feller, W., Messinger, I., Bertiger, W., Muellerschoen, R., Iijma, B., Piesinger, G. (1998): *A Close Look at SatLoc's Real-Time WADGPS System*. GPS Solutions 2 (2): 16–28.
- Wolf, R., Thalhammer, M., Hein, G. (2003): *GATE - The German Galileo Test Environment*. ION GPS/GNSS 2003: 1009–1015.
- Wübbena, G. (1983): *Simulation und Auswertung von Meßdaten im Strecken- und Dopplermodus arbeitender NAVSTAR-GPS-Empfänger zur absoluten und relativen geodätischen Positionsbestimmung*. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Institut für Erdmessung, Universität Hannover.
- Wübbena, G. (1991): *Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionierung*. Wiss. Arb. Universität Hannover, Nr. 168.
- Wübbena, G. (2001): *Zur Modellierung von GNSS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung*. Wiss. Arb. Universität Hannover, Nr. 239: 143–155.
- Wübbena, G. (2002): *Zur großräumigen Echtzeit-Vernetzung von GNSS-Referenzstationen*. Präsentation zum 4. SAPOS-Symposium, Hannover, <http://www.geopp.de/download/sapos-02-pro.pdf>.
- Wübbena, G. (2003): *Zur Nutzung von NTRIP in lokalen, regionalen und globalen Echtzeitnetzen*. 5. SAPOS-Symposium, Frankfurt a.M., [www.geopp.de/download/nutzung\\_von\\_ntrip.pdf](http://www.geopp.de/download/nutzung_von_ntrip.pdf).
- Wübbena, G., Bagge, A. (1997): *Neuere Entwicklungen zu GNSS-RTK für optimierte Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit: Referenzstationsnetze und Multistations-RTK-Lösungen*. In: Seeger, Riedl (1999).
- Wübbena, G., Bagge, A. (2002): *RTCM Message Type 59-FKP for Transmission of FKP*. Geo++ GmbH, White Paper, 17. April 2002, Garbsen, <http://www.geopp.de/download/geopp-rtcm-fkp59.pdf>.
- Wübbena, G., Bagge, A., Hoppe, T. (2001): *Zur Bildung von Subnetzen in der Referenzstationsvernetzung mit Geo++ GNSMART – Konzepte und Untersuchungen*. Bericht 6.9.2001, Garbsen, <http://www.geopp.de/download/gnsmart-subnetze.pdf>.
- Wübbena, G., Bagge, A., Schmitz, M. (2000): *Referenzstationsnetze und internationale Standards*. 3. SAPOS-Symposium, München.
- Wübbena, G., Bagge, A., Seeber, G. (1996): *Developments in Real-Time Precise DGPS Applications - Concepts and Status*. In: Beutler, Hein, Melbourne, Seeber (1996): 212–216.
- Wübbena, G., Bagge, A., Seeber, G., Böder, V., Hankemeier, P. (1996): *Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks*. ION GPS 96: 1845–1852.
- Wübbena, G., Willgalis, S. (2001): *State Space Approach for Precise Real Time Positioning in GPS Reference Networks*. Proceed. KIS 2001, Banff: 72–79.

- Zebhauser, B., Euler, H.-J., Keenan, C., Wübbena, G. (2002): *A Novel Approach for the use of Information from Reference Station Networks Conforming to RTCM V2.3 und Future V3.0*. ION NTM 2002.
- Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M., Webb, F. (1997): *Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks*. JGR, 102, B3.

## Dank

Allen, die zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben, möchte ich abschließend ganz herzlich danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Seeber danke ich dafür, dass er mir neben den Aufgaben im Institut und in der Lehre den notwendigen Freiraum gegeben hat, die Forschungsarbeiten durchzuführen und mich dabei über die Beschäftigungszeit am IfE hinaus bis zum Abschluss unterstützt hat. Auf seine langjährigen intensiven Verbindungen mit Brasilien gehen auch die vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie geförderten Kooperationsprojekte im Rahmen der Wissenschaftlich-Technologischen Zusammenarbeit mit Brasilien zurück, die für meine Untersuchungen grundlegend waren. Für die Übernahme des Hauptreferates danke ich ihm ebenso wie Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Kutterer für die Übernahme des Korreferates und die Anregungen für die Fertigstellung der Dissertation.

Ein großer Teil der Untersuchungen erfolgte im südniedersächsischen Referenzstationsnetz des Landesbetriebes für Landesvermessung und Geoinformation (LGN). Der LGN danke ich für die Möglichkeiten, Einblick in die HPPS- und SAPOS-Entwicklungen zu nehmen und die Referenzstationen bereits frühzeitig für verschiedene Lehr- und Forschungsaufgaben nutzen zu können. Den Mitarbeitern der Abteilung 3 der LGN danke ich für die unkomplizierte Zusammenarbeit sowie für die Referenzstationsdaten und Funkempfänger, ohne die die Untersuchungen nicht möglich gewesen wären. Besonders eindrucksvoll war die gute Zusammenarbeit bei der gemeinschaftlichen Organisation des 4. SAPOS-Symposiums einschließlich des GPS-Antennenworkshops, bei dem die Universität Hannover Gastgeber für knapp 400 Teilnehmerinnen und Teilnehmer sein durfte.

Grundlage der Arbeit war die im niedersächsischen Referenzstationsnetz eingesetzte Software der Geo++ GmbH. Für die Unterstützung beim Einsatz der Software und bei deren Optimierung danke ich den Herren Dipl.-Ing. Bagge und Dipl.-Ing. Hoppe sowie Dr.-Ing. Schmitz und Dr.-Ing. Wübbena.

Meinen ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Böder, Dr.-Ing. Hirt, Dr.-Ing. Jahn, Dr.-Ing. Menge und Dr.-Ing. Völksen danke ich für die stets freundschaftliche Zusammenarbeit. Die vielen Diskussionen waren für mich weit über diese Dissertation hinaus wertvoll. Für die vielen kleinen Beiträge danke ich den Mitarbeitern des Instituts ebenso wie den Teilnehmerinnen und Teilnehmern der Projektseminare, den zahlreichen Diplomanden und den wissenschaftlichen Hilfskräften für die tatkräftige Unterstützung bei den Messungen. Ein ganz herzliches „muito obrigado“ geht an Frau Prof. Dr. Krüger von der Universidade Federal do Paraná in Curitiba und Frau Prof. Dr. Romão von der Universidade Federal de Pernambuco in Recife sowie deren Kollegen und Studierenden, die mit hohem Einsatz an dem Kooperationsprojekt beteiligt waren.

Für meinen beruflichen Werdegang war die Techniker Ausbildung am Katasteramt Recklinghausen entscheidend. In einem sehr motivierenden Umfeld konnte mich der Ausbildungsleiter Herr Dipl.-Ing. Köppl für das vielfältige Vermessungswesen begeistern. Für diese Starthilfe danke ich ihm sehr und freue mich über die vielen Stunden, die wir unserer gemeinsamen Leidenschaft, der Leichtathletik, gewidmet haben.

Der Schritt an die Universität Hannover wäre ohne den Rückhalt meiner Eltern kaum möglich gewesen, wofür ich ihnen zutiefst dankbar bin. Das Studium in Hannover und Calgary hat mir neue Welten eröffnet. Das Stipendium der Studienstiftung des deutschen Volkes war dabei eine unschätzbare Hilfe, für die ich sehr dankbar bin. Abschließend gilt mein herzlicher Dank meiner Frau Heike für ihre Geduld und ihre kontinuierliche Unterstützung meiner Arbeit.

## Lebenslauf

Stefan Willgalis

geboren am 29.08.1967 in Recklinghausen

verheiratet mit Heike Willgalis, geb. Goldammer

- |             |   |
|-------------|---|
| 1973 – 1977 | Albert-Schweitzer-Grundschule Oer-Erkenschwick  |
| 1977 – 1983 | Christoph-Stöver-Realschule Oer-Erkenschwick  |
| 1983 – 1986 | Ausbildung zum Vermessungstechniker und Tätigkeit als Technischer Angestellter, Katasteramt Recklinghausen  |
| 1986 – 1989 | Städtische Kollegschele Kemnastr., Recklinghausen, mit dem Abschluss der Allgemeinen Hochschulreife   |
| 1989 – 1995 | Studium des Vermessungswesens an der Universität Hannover mit dem Abschluss „Diplom-Ingenieur“  |
| 1993        | Walter-Großmann-Preis der Gesellschaft zur Förderung der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover   |
| 1993 – 1994 | Studienjahr am Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Kanada   |
| 1995 – 1997 | Wissenschaftlicher Angestellter u.a. im DFG-Projekt „Deformationsmessungen Südwest-Island“, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, TU Braunschweig        |
| 1998 – 2003 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Arbeitsgebiet Geodätische Astronomie und Satellitengeodäsie, Institut für Erdmessung, Universität Hannover                  |
| 2003 – 2005 | Referendariat für den höheren technischen Verwaltungsdienst, Bezirksregierung Hannover, mit dem Abschluss „Assessor des Vermessungs- und Liegenschaftswesens“ |



# Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover

*(Eine vollständige Liste der Wiss. Arb. ist beim Geodätischen Institut, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover erhältlich.)*

- |         |                    |   |
|---------|--------------------|---|
| 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 | ZAHARAN, 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)                             |
| Nr. 246 | KARANJA, F. N.:    | Use of Knowledge Based Systems for the Detection and Monitoring of Unplanned Developments. (Diss. 2002)   |
| Nr. 247 | MENGE, Falko:      | Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung (Diss. 2003)                              |
| Nr. 248 | FEI, Lifan:        | A Method of Automated Cartographic Displacement – On the Relationship between Streets and Buildings – (Diss. 2002)                                |
| Nr. 249 | STRAUB, Bernd-M.:  | Automatische Extraktion von Bäumen aus Fernerkundungsdaten. (Diss. 2003)  |
| Nr. 250 | Festschrift:       | Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Hans Pelzer zur Emeritierung anlässlich seines 68. Geburtstages (2004)                                 |
| Nr. 251 | MANN, Wilfried:    | Integratives Auswertemodell zur Beschreibung des Immobilienmarktes (2004)   |
| Nr. 252 | MÜLLER, J. (Red.): | Geoforum 2004. Geoinformationssysteme: Grundlagen – Nutzungen – Entwicklungen. Beiträge der Geoforums 2004, Hannover, Leibnizhaus,                |
| Nr. 253 | HIRT, Christian:   | Entwicklung und Erprobung eines digitalen Zenitkameranetzes für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung. (Diss. 2004)                            |
| Nr. 254 | ROLAND, Markus:    | Untersuchungen zur Kombination terrestrischer Schweredaten und aktueller globaler Schweredaten. (Diss. 2005)                                      |
| Nr. 255 | WILLGALIS, Stefan: | Beiträge zur präzisen Echtzeitpositionierung in GPS-Referenzstationsnetzen. (Diss. 2005)  |

*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.*