

GNSS-basierte Ortungs- und Navigationsverfahren für maritime „Safety of Life“ Anwendungen

E. Engler, J. Beckheinrich, A. Hirrle, D. Klähn, T. Noack, R. Reimer, S. Schlüter

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

171235 Neustrelitz

Kalkhorstweg 53

1 Einführung

Eine Grundvoraussetzung für die Überwachung und Steuerung von Verkehrsprozessen jeglicher Art ist die präzise und verlässliche Kenntnis der Position der Verkehrsteilnehmer. Zum Schutz des Lebens im Sinne der Gefahrenvermeidung ist es erforderlich, Positionsgenauigkeiten mit einer definierten Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Die Konsequenz ist, dass bei der Entwicklung von neuen Satellitennavigationssystemen wie Galileo aber auch bei der Weiterentwicklung existierender wie GPS ein besonderes Augenmerk auf die Eigenüberwachung der Integrität des Globalen Navigationssatelliten-systems (GNSS) gelegt wird.

Im maritimen Bereich sind die Leistungsanforderungen durch die Internationale Maritime Organisation (IMO) situations- und anwendungsbezogen spezifiziert. Ausgewählte Werte sind in Tab. 1 angegeben. So wird es als ausreichend angesehen, dass die Positionsbestimmung auf hoher See und im Küstenbereich mit einer horizontalen Genauigkeit von unter 10 m bestimmt wird. Steigt der Positionsfehler systembedingt über 25 m, so ist gefordert, dass der Systembetreiber des GNSS den Nutzer innerhalb von 10 s darüber informiert. Das Integritätsrisiko, das effektiv die maximal erlaubte Wahrscheinlichkeit beschreibt, mit der systembedingte Fehlfunktionen nicht erkannt werden, darf 10^{-5} innerhalb von 3 Stunden nicht überschreiten. Dieser Bedarf wird durch den Galileo „Safety of Life“-Service (SoL) direkt abgedeckt.

In verkehrstechnisch kritischen Bereichen wie Häfen oder Seekanälen steigt die Genauigkeitsanforderung auf 1 m und bei speziellen Anwendungen wie assistierten Anlegemanövern, Ausbaggerung und Güterumschlag sogar auf 1 dm. Um diese Leistungsanforderungen zukünftig erreichen zu können, sind die Entwicklung ergänzender Verfahren und ihre technologische Integration bord- als auch landseitig notwendig.

Das Projekt ALEGRO, das vom Wirtschaftsministerium des Landes Mecklenburg-Vorpommern gefördert wird und eines der Initialprojekte des Forschungshafens Rostock ist, zielt auf die Entwicklung und den Aufbau eines maritimen GBAS-Experimentalsystems (Ground Based Augmentation System). In Bezug auf die im Hafengebiet zu erreichenden Genauigkeiten wird die RTK-Technologie (Real Time Kinematic) als der geeignete Lösungsansatz gesehen. Zu Beginn des Beitrages wird die geplante Architektur des ALEGRO GBAS vorgestellt. Besonderes Augenmerk wird dabei auf Komponenten gelegt, die in Bezug auf die zu gewährleistende Integrität und auf die

	System Level Parameters				Service Level Parameters		
	Accuracy	Alarm Limit	Integrity		Availability	Continuity	Coverage
	Horizontal		Time to Alarm	Integrity Risk	% per 30 days	% over 3 hours	
(m)	(m)	(s)	(per 3 hours)				
Ocean / Coastal	10	25	10	10^{-5}	99.8	N/A	Global
Port	1	2.5	10	10^{-5}	99.8	99.97	Local
Automatic Docking	0.1	0.25	10	10^{-5}	99.8	99.97	Local

Tab. 1 Auswahl maritimer Nutzungsanforderungen für Navigation [IMO A.915(22)]

zukünftige Nutzung von Galileo eine Weiterentwicklung genutzter Verfahren darstellen. Eine für die Integrität grundlegende Komponente dieses Systems ist die Eigenüberwachung der GNSS-Signale im lokalen Kontext. Ihre Aufgabe ist neben der Bewertung der GNSS-Signalqualität insbesondere die Detektion und Klassifikation lokaler Störungen in Folge von Signalausbreitungseffekten und Interferenzen. Ein Überblick über nutzbare Qualitätskenngrößen und die zu ihrer Bestimmung verwendeten Verfahren wird im nächsten Abschnitt gegeben. Einerseits wird durch die Integration dieser in Echtzeit abgeleiteten Qualitätskenngrößen eine situationsangepasste Datenprozessierung bei der Bereitstellung von Ergänzungs- und Korrekturinformationen verfolgt. Andererseits bieten gerade sie die notwendige Datenbasis, um durch ihre Langzeitbestimmung verlässliche Aussagen über die Leistungsfähigkeit GNSS-basierter Positionsbestimmung zu bekommen. Weiterhin bietet das RTCM-Format neben den bereits festgelegten Messages noch genügend Spielraum, um neben den an der GBAS-Station gemessenen Code- und Trägerphasenmessungen auch Zusatzinformationen zu übertragen, die es den lokalen Nutzern ermöglichen, eine situationsbezogene Auswahl, Bewertung und Korrektur der zur Positionsbestimmung zu verwendenden Satellitendaten vorzunehmen.

Wenn für das Erreichen hochpräziser Ortung GBAS als ergänzende Infrastruktur benötigt wird, ist folglich die aktuelle Leistungsfähigkeit des GNSS und des GBAS im Sinne der Integrität gemeinsam zu bewerten. Das impliziert eine Eigenüberwachung des GBAS inklusive der Bereitstellung zugeordneter Integritätsinformationen. Im einfachsten Fall, wenn nur ein Empfänger GBAS-seitig zum Einsatz kommt, sind folglich neben der Systemfunktionalität die Korrektheit der ausgesendeten Ergänzungsinformationen zu prüfen und die damit erreichbare Positionsgenauigkeit zu bewerten. Um jedoch empfängerspezifische Effekte eliminieren und um die Dekorrelation von Ausbreitungsfehlern handhaben zu können, ist ein lokales Messnetz bestehend aus mehreren Empfängern notwendig. Diese Weiterentwicklung ist gegenwärtig nicht Bestandteil des Projekts ALEGRO.

2 Architektur des ALEGRO GBAS

Grundbausteine des ALEGRO GBAS (Abb. 1) sind ein hochratiger GNSS-Empfänger (20Hz), der mit einer speziellen Firmware ausgestattet ist, um Ergänzungsinformationen im RTCM-Format bereitzustellen. Dadurch war es bereits zu Projektbeginn möglich, die Leistungsfähigkeit RTK-basierter Positionsbestimmung auf der Grundlage kommerziell verfügbarer RTK-Technik im Rahmen einer Messkampagne zu untersuchen.

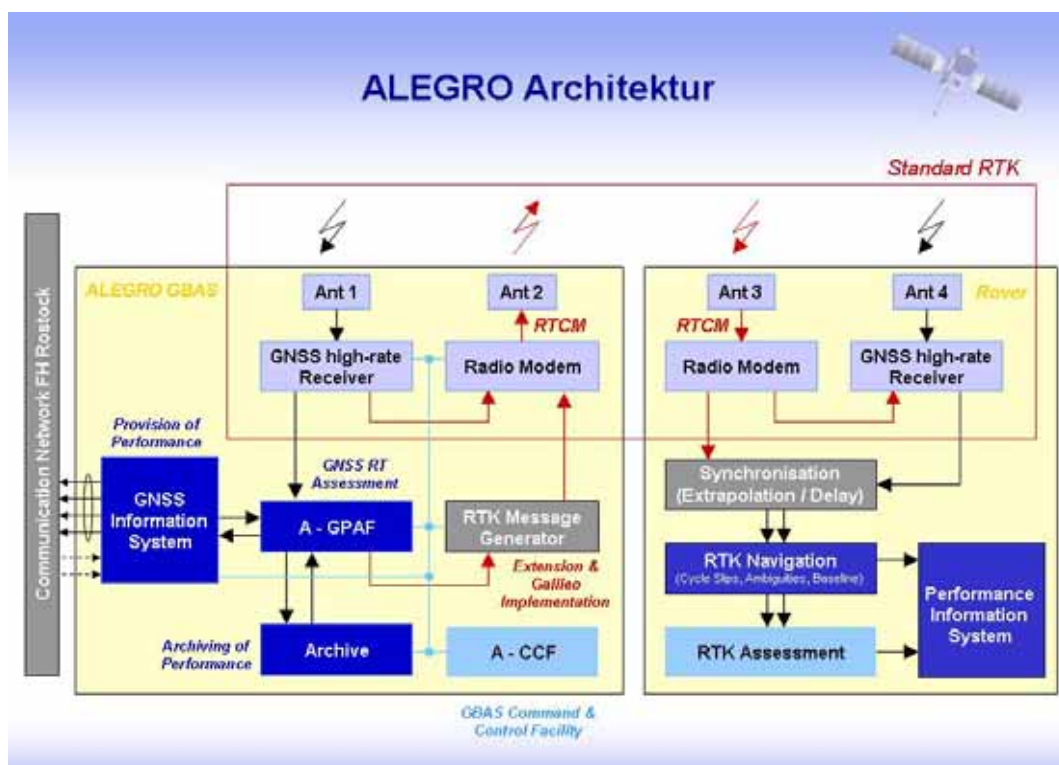


Abb. 1 Architektur des ALEGRO Ground Based Augmentation System

Für einen maritimen, dynamischen Nutzer (Forschungsschiff „Prof. A. Penck“), der im Hafen Rostock und in der Hafeneinfahrt kreuzte, konnte an 4 aufeinander folgenden Tagen nachgewiesen werden, dass bei autonomer Nutzung von GNSS (GPS +GLONASS, Zweifrequenzverfahren mit Carrier Smoothing) bereits horizontale Genauigkeiten unter 3 Metern und beim Einsatz von RTK unter 2dm erreicht werden können (Abb. 2). Eine dazu für RTK wesentliche Voraussetzung ist die permanente Verfügbarkeit von gültigen Korrektur-informationen.

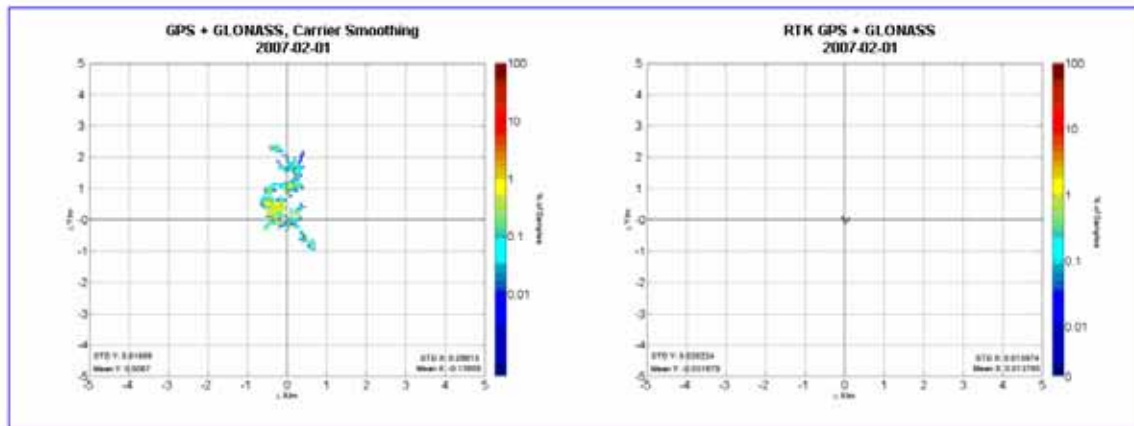


Abb. 2 Horizontale Positionsgenauigkeit für GPS/GLONASS stand alone Positionierung (links) und RTK-basierte Positionsbestimmung (rechts)

Der im ALEGRO GBAS eingesetzte Empfänger ist bereits so ausgelegt, dass durch ein zukünftiges Firmware-Update auch der Empfang von Galileo-Signalen unterstützt wird. Derzeit werden durch ihn Code- und Trägerphasenmessungen mit hoher zeitlicher Auflösung (20 Hz) sowie Zusatzdaten wie Signalamplituden und Signal-Rausch-Verhältnisse (SNR) im oberen und unteren L-Band bereitgestellt. Nach ihrer Konvertierung in ein internes Datenprotokoll werden sie in der ALEGRO's GNSS Performance Assessment Facility (A-GPAF) weiterverarbeitet.

Innerhalb des hierarchisch aufgebauten Datenprozessierungssystems, das in seiner Struktur und seinen Funktionen im Abschnitt 3 näher beschrieben wird, werden die einlaufenden Daten auf Vollständigkeit und Plausibilität geprüft. Zugeordnet erfolgt eine Bestimmung sowohl von datentyp- und satellitenspezifischen als auch stations-bezogenen Qualitätskenngrößen und Fehler-anteilen. Diese abgeleiteten Informationen dienen einerseits dazu, die Leistungsfähigkeit des genutzten GNSS in Echtzeit (GNSS Informationssystem) zu charakterisieren und zu archivieren. Andererseits sind die in Echtzeit verfügbaren Qualitätskenngrößen die datentechnische Grundlage, um die Bereitstellung von Korrektur- und Ergänzungsinformationen situationsbezogen zu gestalten. In welcher Art und Weise dies umsetzbar ist und wie eine Datenveredelung zu erfolgen hat, ist laufender Untersuchungs- und Entwicklungsgegenstand. Für die Umsetzung, insbesondere auch im Hinblick auf Galileo, ist jedoch eine eigenständige Generierung der Ergänzungsinformationen im RTCM-Format notwendig.

Durch die derzeitige Begrenzung des GBAS auf eine Referenzstation ist eine messtechnische Überprüfung der ausgestrahlten Ergänzungsinformationen erst in einem Folgeprojekt geplant. Im Rahmen von ALEGRO werden die generierten Ergänzungsinformationen jedoch genutzt, um die erreichbare Positionsgenauigkeit und die Integrität des GBAS mit den eigenen Rohdaten GBAS intern zu bewerten.

3 GNSS Signalmonitoring

In der ersten Verarbeitungsstufe der A-GPAF werden die Vollständigkeit der Distanzmessgrößen und der Navigationsdaten aber auch erster Datenprodukte geprüft. Daraus ergeben sich erste Indikationen:

- Werden für einen sichtbaren Satelliten keine Daten durch dem Empfänger bereitgestellt, so ist das Satellitensignal entweder abgeschattet oder gravierend gestört.

- Eine Datenbereitstellung für einen sichtbaren Satelliten ist unvollständig, wenn der Empfänger das Signal gerade akquiriert oder in Folge von aufgetretenen Störungen reakkuriert.

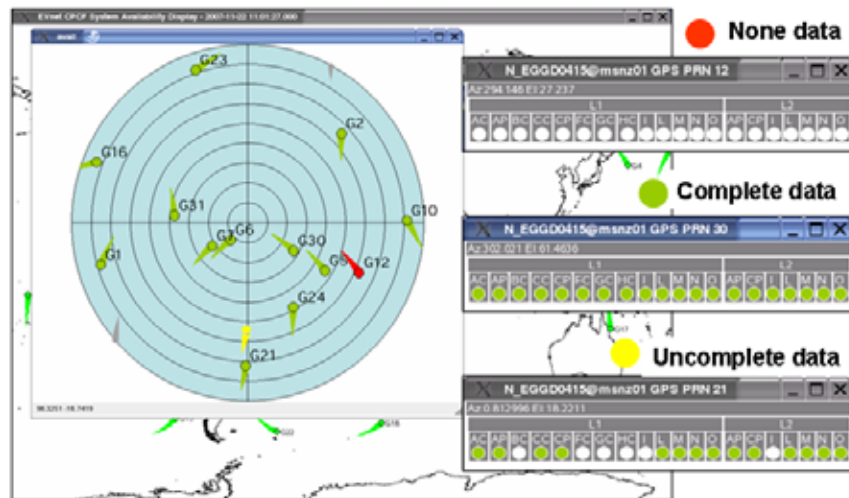


Abb. 3 Vollständigkeitsprüfung der Beobachtungsgrößen und abgeleiteter Datenprodukte

In der folgenden Verarbeitungsstufe wird jede Messgröße einzeln einer Vorverarbeitung unterzogen. Durch die hohe zeitliche Auflösung der Messgrößen (20 Hz) ist es bereits innerhalb weniger Sekunden möglich, die Dynamik der Messwerte zu modellieren und datenspezifische Qualitätskenngrößen abzuleiten. Dazu gehören das Code- und das Trägerphasenrauschen, die momentane Variation der Signalleistung und des SNR sowie die momentane Größe des Mehrwegefehlers. Die Erkennung von Ausreißern und Phasensprüngen wird dabei unter Beachtung des momentanen Rauschverhaltens realisiert.

Signalstörungen in Folge von Mehrwegefehlern, ionosphärischen Störungen oder Signalinterferenzen werden bereits in diesen Größen direkt oder durch Gegenüberstellung mit ihren nominalen Wertebereichen erkennbar. Mehrwegefehler sind direkt hinsichtlich ihrer Größe und Dynamik durch Einsatz des „Carrier Smoothing“ Verfahrens bis auf einen Restfehler bestimmbar, der von der gewählten Zeitkonstante des Filters und dem damit verbundenen Einschwingvorgang abhängig ist. Damit ist es möglich, das Störungspotenzial an der Referenzstation zu überwachen (siehe Abb. 4) und zu reduzieren. Das Verfahren ist jedoch auch nutzerseitig zur Mehrwegeunterdrückung verwendbar.

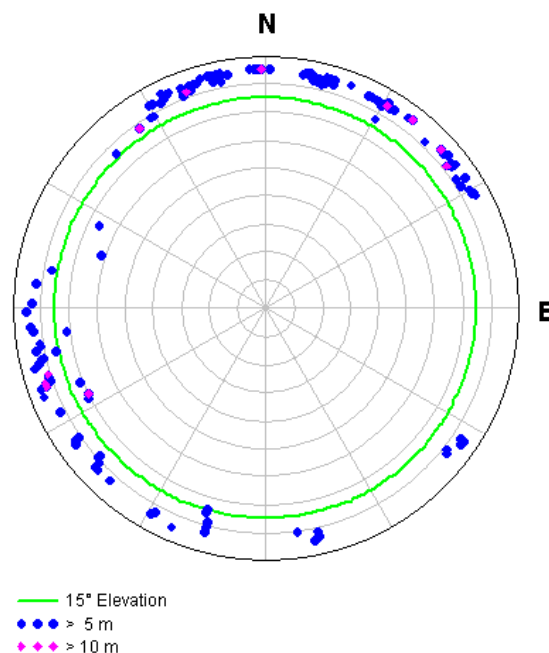


Abb. 4 Erhöhter Mehrwegefehler für an der Referenzstation (Messstandort Pier 1) gemessene GNSS-Signale

Für die Bewertung sowohl des Code- und Trägerphasenrauschens als auch der Variation der Signalleistung ist die messtechnisch begründete Kenntnis des Nominalverhaltens erforderlich. Um dieses ermitteln zu können, werden die referenzstationsbezogenen Qualitätskenngrößen einer routinemäßigen parallel laufenden Analyse unterzogen, um Wertebereiche und Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Größen messtechnisch zu bestimmen und aufzudatieren. Das dafür eingesetzte Verfahren beruht auf der tageweisen Generierung von 1D- und 2D-Histogramme, die sowohl satelliten- als auch stationsbezogenen pro Größe oder Größenpaar generiert werden (siehe z.B. Phasenrauschen als Funktion des SNR in Abb. 5). Aus diesen ist dann z.B. das erwartete Phasenrauschen für einen gemessenen SNR ableitbar. Wertebereichsverletzungen generell sind ein weiterer Indikator für gestörte GNSS-Signale.

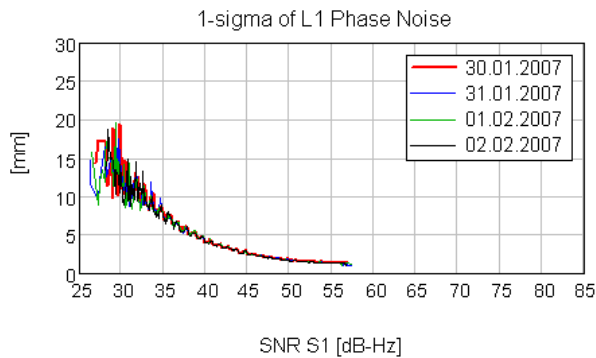


Abb. 5 L1-Phasenrauschen als Funktion des SNR

Ein dafür repräsentatives Beispiel ist die in Tromsø gemessene Signalleistung eines GPS-Satelliten an zwei aufeinander folgenden Tagen (siehe Abb. 6).

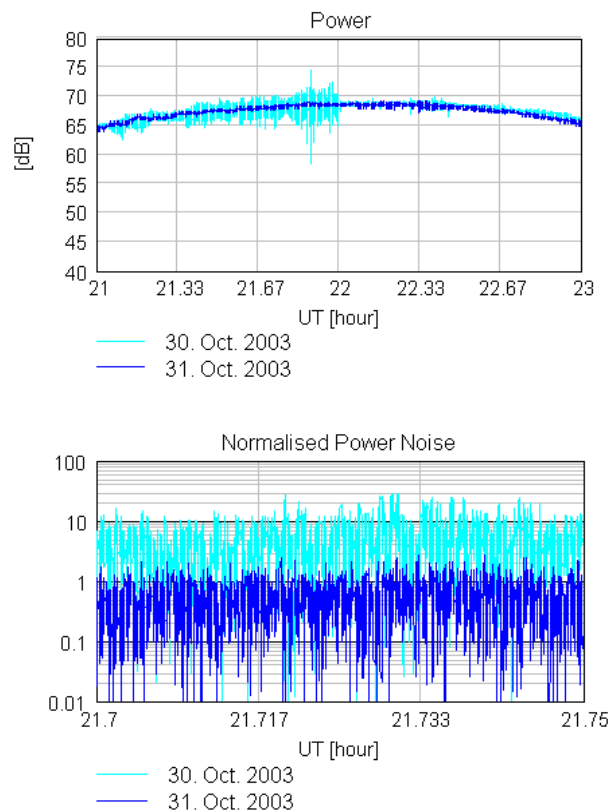


Abb. 6 Signalleistung und normiertes Leistungsrauschen vom PRN 31 gemessen in Tromsø

Bereits aus der Gegenüberstellung der Empfangsleistung unter Beachtung des täglichen Zeitversatzes (Differenz Sternentag zu solaren Tag) wird erkennbar, dass die Leistung am 30.10.2003 insbesondere kurz vor 22 Uhr signifikant stärker variiert. Voruntersuchungen an global verteilten Messstationen haben gezeigt, dass die Standardabweichung der Signalleistung als Funktion der

Signalleistung zumindest beim Einsatz gleicher Empfängertypen allgemeingültig beschreibbar ist. Ein direkter Bezug zum Elevationswinkel ist durch die bis zu 6dB abweichende Sendeleistung von GPS-Satelliten dagegen nicht gerechtfertigt. Normiert man den Wert des mit 20 Hz bestimmten Leistungsrauschen auf die nominal zu erwartende Standardabweichung, so repräsentieren Werte kleiner 2 den 1σ -Wertebereich (Exponentialverteilung) bei normalen Empfangsbedingungen. Das wird durch Messergebnisse vom 31.10.2003 bestätigt. Liegt der Wert deutlich über 2 und erreicht sogar 30-fache Werte, so resultiert daraus, dass die Leistungsvarianz deutlich erhöht ist und sich letztlich negativ auf das Nachführen des GPS-Signals durch den Empfänger und damit auf die Qualität der erhaltenen Messwerte auswirkt. Ursache in diesem Fall war ein ionosphärischer Sturm mit starken Amplitudenzintillationen.

Um letztlich zu einer verlässlichen Bewertung der GNSS-basierten Positionsgenauigkeit zu gelangen, werden in der letzten Verarbeitungsstufe der A-GPAF die vorprozessierten Daten kombiniert weiterverarbeitet. Im Sinne der Datenveredelung werden weitere Fehleranteile wie der Ionosphärenfehler und seine Rate, die eine Zwei- oder Mehrfrequenzverarbeitung erfordern, bestimmt. Darüber hinaus sind trägerspezifische Fehlermodelle wie z.B. der Mehrwegefehler auf L1 und L2 nicht für zwei- oder mehrfrequenzbasierte Verfahren durch ihre Korrelation direkt übernehmbar. Eine verfahrensbezogene Bestimmung von Messfehlergrößen ist damit weiterführend erforderlich. Darüber hinaus erlaubt erst die kombinierte Betrachtung von in der Vorprozessierung bestimmten Indikatoren eine Erkennung der Fehlerursachen (siehe Abb. 7).

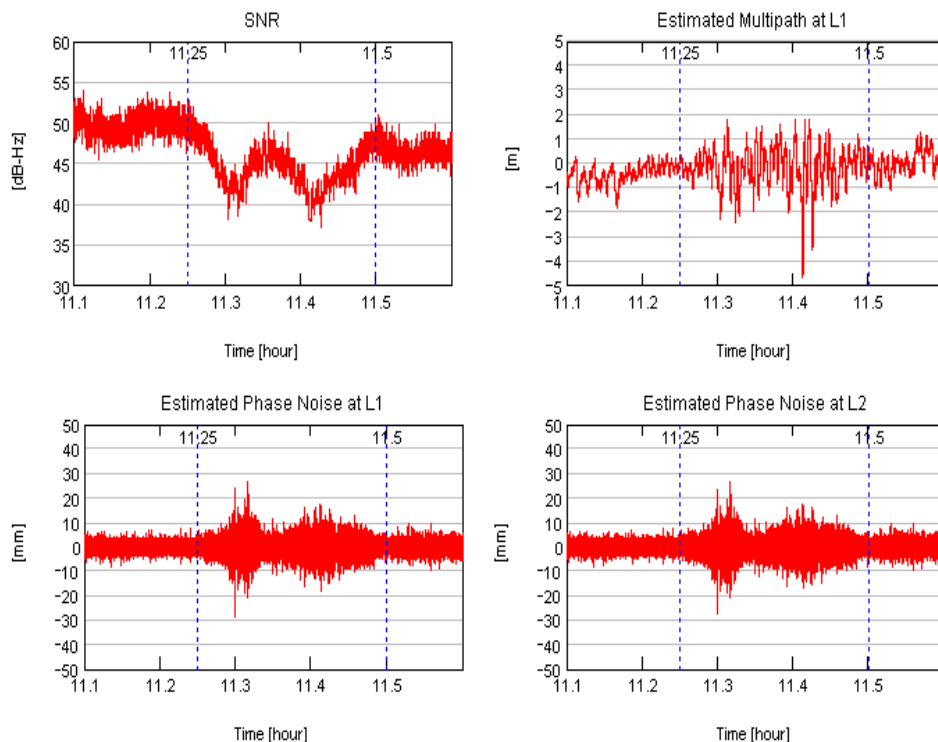


Abb. 7 SNR Schwankung korreliert mit erhöhtem Mehrwegefehler und Phasenrauschen auf dem GPS L1 Signal sowie zugeordnet das Phasenrauschen auf dem L2-Signal

Letztlich erfolgt die abschließende Bewertung der GNSS-Leistungsfähigkeit anhand der Eigenbestimmung der Position der Referenzstation und dem Soll-Ist-Vergleich mit ihren bekannten Koordinaten. Bereits bestimmte Qualitätskenngrößen können dabei optional zur situationsbezogenen Konditionierung der bei der Positionsbestimmung verwendeten Messfehlermodelle (Weighted Least Square Verfahren) dienen. Alternativ oder ergänzend kann eine während der Positionsbestimmung durchgeführte Ausgleichsrechnung (DIA-Methode: Detection, Identification, Adaption) zur ergänzenden Identifikation gestörter Satellitensignale und zu ihrem Ausschluss bei der Positionsbestimmung führen.

In Abb. 8 ist der horizontale Positionsfehler bei Nutzung des Weighted Least Square Algorithmus für die Positionsbestimmung dargestellt. Durch die hohe Anzahl operationeller GPS-Satelliten können bereits heute mehr als 10 Satellitensignale gleichzeitig zur Positionsbestimmung genutzt werden. Bei Verwendung des Weighted Least Square Algorithmus liegt der Positionsfehler im Mittel im Bereich von

5 m. Lediglich zwischen 8:40 und 8:50 ist ein gravierender Anstieg des Positionsfehlers auf über 20 m beobachtbar.

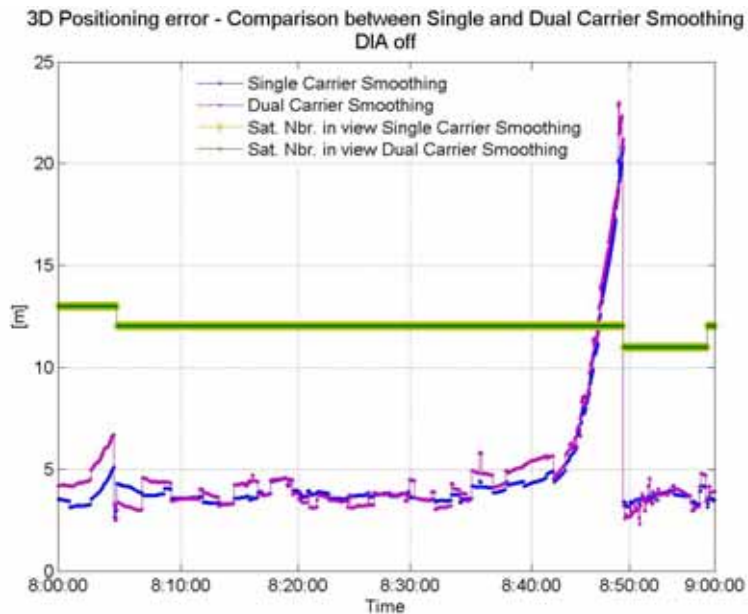


Abb. 8 Positionsbestimmung mit dem Weighted Least Square Verfahren

Da bei dieser Positionsbestimmung die Anzahl sichtbarer und zur Positionsbestimmung genutzter Satelliten gleich ist, liegt der Verdacht nahe, dass GNSS-Signale mit temporär hohem Fehleranteil das Positionsergebnis deutlich verfälscht haben. Da der erhöhte Positionsfehler gleichermaßen bei der Einfrequenzprozessierung (Ionosphärenkorrektur mit Klobuchar-Modell) und bei der Zweifrequenzprozessierung (Eigenkorrektur des Ionosphärenfehlers) auftritt, kann der ionosphärisch bedingte Ausbreitungsfehler als Fehlerursache ausgeschlossen werden. Die qualitative Übereinstimmung der Positionsfehler bei der ein- und zweifrequenzbasierten Lösung belegen weiterhin, dass bezogen auf die Ionosphäre ruhige Ausbreitungsbedingungen vorlagen.

Wird der DIA-Algorithmus genutzt (siehe Abb. 9), so wird der PRN 25 als gestört identifiziert und von der Positionsbestimmung ausgeschlossen. Die Positionsfehler vor 8:50 Uhr vermindern sich dadurch signifikant.

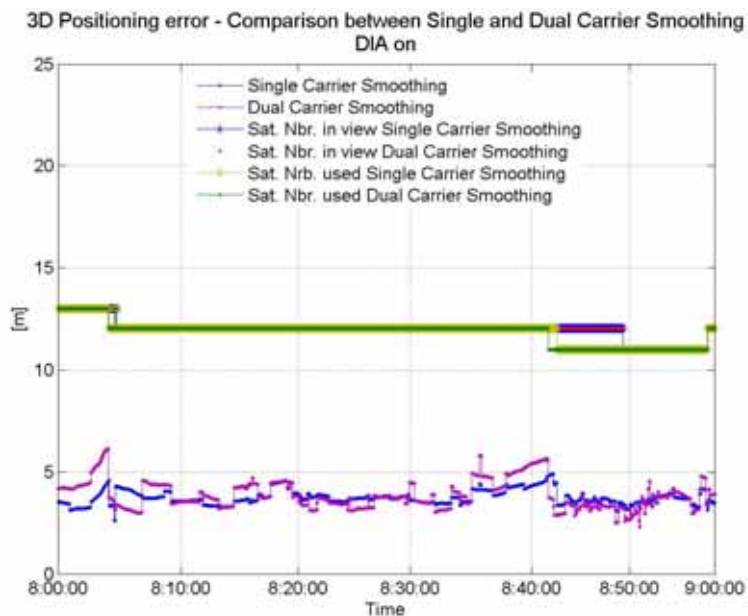


Abb. 9 Positionsbestimmung mit dem DIA-Verfahren

Dieses interessante Fallbeispiel verdeutlicht einerseits, dass auch bei intelligenter Vorverarbeitung (u.a. Cycle Slip Detektion, Mehrwegeunterdrückung) und Fehlerkorrektur noch system- oder empfangenbedingte Fehleranteile in den Entfernungsmessungen enthalten sind, die sich deutlich negativ auf den Positionsfehler auswirken, falls keine zusätzliche Ausgleichsrechnung während der Positionsbestimmung durchgeführt wird. Andererseits sind gerade solche Datenbeispiele für eine vertiefende Fehlerbetrachtung interessant.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die notwendigen Basismodule für die A-GPAF sind bereits für die Ein- und Zweifrequenzprozessierung entwickelt und softwaretechnisch umgesetzt. Sie werden derzeit einer experimentellen Validierung unterzogen. Parallel dazu erfolgt die Langzeitbestimmung und –aufzeichnung der Qualitätskenngrößen anhand der in Rostock empfangenen GNSS-Signale. Die GBAS-Station befindet sich direkt im Hafengelände auf einem Gebäude der Hafenentwicklungsgesellschaft Rostock (siehe Abb. 10).



Abb. 10 Standort des ALEGRO GBAS

Durch die Verwendung der EVnet-Technologie (Experimentier- und Verifikationsnetzwerk), die im Rahmen des Projekts GalileoNav entwickelt wurde, ist es möglich, das experimentelle GBAS modular und hierarchisch aufzubauen und Systemerweiterungen und Moduls substitutionen relativ komplikationslos vorzunehmen.

Das ist einerseits notwendig, um insbesondere die sich aus Galileo ergebenden neuen Lösungsansätze, die vorrangig aus der Mehrfrequenzprozessierung und aus der Bereitstellung der GNSS-Integritätsinformation resultieren, zukünftig in das GBAS zu integrieren. Hilfreich dabei ist die bereits im Datenmanagement und in der Schnittstellenspezifikation vorbereitete Multisystem- und Multifrequenz-datenverarbeitung. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass sich aus den Ergebnissen laufender Analysen und Entwicklungen des GBAS der Bedarf ergibt, die Signalverarbeitung im GBAS weiter auszubauen. Primär verfolgter Ansatzpunkt im Rahmen des Projektes ALEGRO ist die situationsbezogene Bereitstellung und Bewertung der GBAS Ergänzungsinformationen sowie die Auswahl und Generierung veredelter Qualitätskenngrößen zur Beschreibung der Genauigkeit und Verlässlichkeit GBAS-basierter Positionsbestimmung.

Entsprechend dem Entwicklungsstand des Projektes ALEGRO wurden im Rahmen dieser Darstellung vorab das Konzept und erste Entwicklungsergebnisse vorgestellt. Zum Ende der Projektlaufzeit wird ein erster Prototyp eines experimentellen GBAS für maritime „Safety of Life“ Anwender im Hafen

Rostock zur Verfügung stehen. Folgeaufgaben, wie die Erprobung des GBAS mit realen Galileo-Signalen und die bordseitige Integration sind Inhalt geplanter Folgeprojekte.

Bereits heute ist das bereits aufgebaute Experimentalsystem im Hafen Rostock nutzbar, um alternative Ortungsverfahren hinsichtlich der erreichten Genauigkeit zu bewerten oder um eine RTK-basierte Positionsbestimmung durchzuführen. Dafür ist die Nutzung oder der parallele Betrieb der DLR-eigenen ROVER-Empfangstechnik erforderlich.

Im Rahmen des Projektes „Advanced Sailing Management System“, das unter Leitung des Schiffahrtsinstitut Warnemünde durchgeführt wird, werden neben der Validierung anderer GNSS-Empfangstechnik auch der weitere Ausbau des GBAS durch den Aufbau einer weiteren Empfangsstation ähnlich der bereits vorhandenen (siehe Abb. 11) geplant.

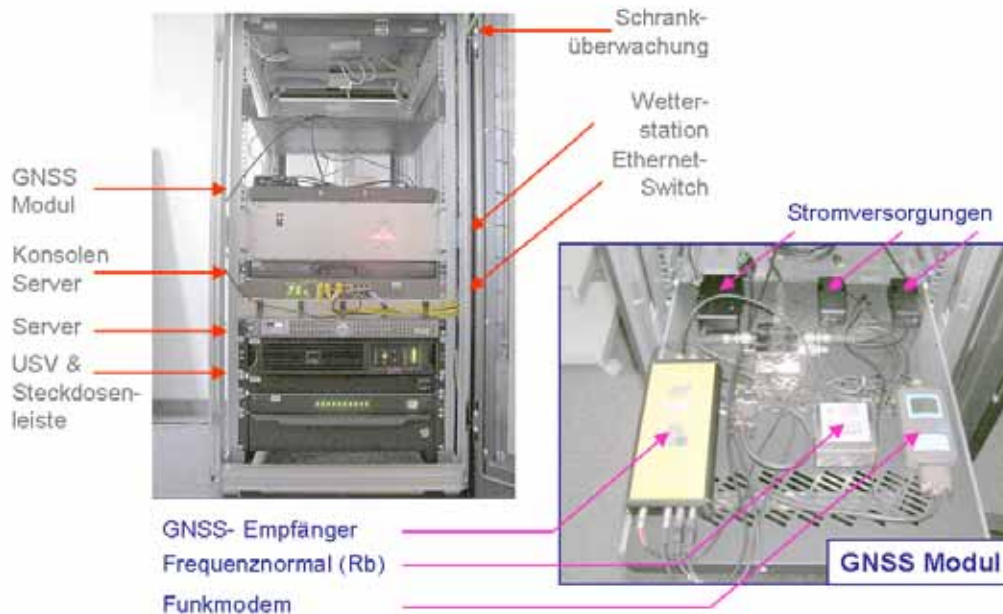


Abb. 11 HW-Aufbau der ALEGRO GBAS Basisstation

5 Danksagung

Unser Dank gilt dem Wirtschaftsministerium des Landes Mecklenburg-Vorpommern, das uns das Projekt ALEGRO ermöglicht hat und damit die Entwicklung von GBAS für maritime „Safety of Life“ Anwendungen im Rahmen des Forschungshafens Rostock forciert.

Der Hafententwicklungsgesellschaft Rostock gehört unser Dank für die Schaffung der infrastrukturellen Voraussetzungen für den Aufbau des ALEGRO-Experimentalsystems.

Für die komplikationslose Nutzung des Forschungsschiffes „Prof. A. Penck“ im Rahmen der Initialmesskampagne bedanken wir uns beim Institut für Ostseeforschung.

6 Literatur u.a.

- Mateo, J.C.: EGNOS at the Service of the Maritime Community. In EGNOS The European Geostationary Overlay System – A cornerstone of Galileo. ESA 2006, ISBN 92-9092-453-5
- IMO A.915(22)
- Engler, E. (2007): Technischer Bericht zur Messkampagne 30.01. bis 02.02.2007: Rohdatenqualität und Verfügbarkeit. DLR IKN, Neustrelitz.
- Hirrlé, A. (2007): Technischer Bericht zur Messkampagne 30.01. bis 02.02.2007: Plausibilitätsprüfung genutzter Quelldateien (NMEA, RINEX und Georeferenzierung). DLR IKN, Neustrelitz.
- Schlüter, S. (2007): Technischer Bericht zur Messkampagne 30.01. bis 02.02.2007: Positionsverfügbarkeit und –Qualität. DLR IKN, Neustrelitz.