

# HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

Journal of Applied Hydrography

06/2023

HN 125

3D-Positionierung  
auf See

60km



# Entwicklung und Umsetzung eines SSR-RTK-Korrekturdatendienstes für hochgenaue Positionierung in der deutschen AWZ in der Nordsee

Ein Beitrag von *CORD-HINRICH JAHN, PATRICK WESTFELD, BERND VAHRENKAMP, GERHARD WÜBBENA, MARTIN SCHMITZ, ROBERT SCHUMANN und CHRISTOPH WALLAT\**

In einem zweijährigen Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde der Prototyp eines GNSS-basierten Echtzeitdienstes unter Verwendung eines SSR-RTK-Ansatzes (SSR: state space representation, RTK: real-time kinematic) für die Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) in der Nordsee entwickelt. Da das Zielgebiet der Nordsee nur mit einer heterogenen Verteilung von GNSS-Referenzstationen repräsentiert werden kann, kommt dem Berechnungsalgorithmus und der Modellierung der GNSS-Korrekturdaten besondere Bedeutung zu. Maritime Messungen im Zielgebiet bestätigten die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Prototyps durch eine knapp 90-prozentige Verfügbarkeit des RTK-Status fix bei Initialisierungszeiten unter zwei Minuten. See- und Landmessungen sowie eine dauerhafte Monitoringstation wurden zum Nachweis der Qualitätsziele verwendet.

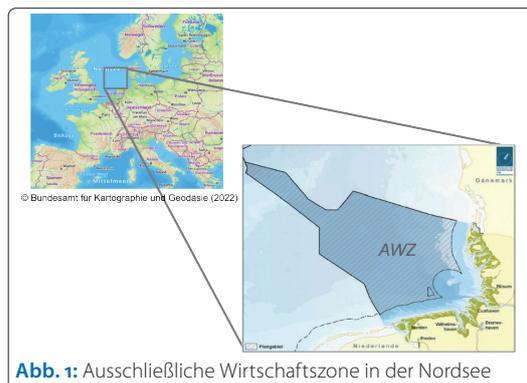
GNSS | SSR-RTK | 3D-Positionierung | Seevermessung  
GNSS | SSR-RTK | 3D positioning | hydrographic surveying

In a two-year research and development project, the prototype of a GNSS-based real-time service using an SSR-RTK approach (SSR: state space representation, RTK: real-time kinematic) was developed for the Exclusive Economic Zone (EEZ) in the North Sea. Since the target area of the North Sea can only be represented with a heterogeneous distribution of GNSS reference stations, the calculation algorithm and the modelling of the GNSS correction data are of particular importance. Maritime measurements in the target area confirmed the basic functionality of the prototype through an almost 90 percent availability of the RTK status fix with initialisation times of less than two minutes. Sea and land measurements as well as a permanent monitoring station were used to prove the quality targets.

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) ist als Hydrographischer Dienst Deutschlands unter anderem für Vermessungsaufgaben in den deutschen Hoheitsgebieten und in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) in Nord- und Ostsee zuständig. Ein weiterer Aufgabenbereich umfasst die Raumplanung sowie die Prüfung und Genehmigung von Anlagen zur Stromgewinnung in Nord- und Ostsee. Zur Seevermessung (z. B. engmaschige Vermessung der Fahrwasser und Meeresgebiete) wird der hochpräzise Echtzeit-Positionierungsservice (HEPS) des SAPOS-Dienstes der deutschen Landesvermessung (AdV 2022) bereits seit 2009 verwendet (Ellmer 2013), um die Vermessungsschiffe des BSH im amtlichen Koordinatenreferenzsystem hochgenau zu positionieren. Dieses gelingt seit dieser Zeit erfolgreich im

küstennahen Bereich der Nordsee, der durch SAPOS-Referenzstationen optimal abgedeckt ist. Dagegen ist im küstenfernen Bereich der AWZ in der Nordsee (Abb. 1) der HEPS-Dienst nicht verfügbar. Daraus resultiert eine grundlegende Fragestellung



## Autoren

Dr. Cord-Hinrich Jahn arbeitet beim LGLN; Dr. Patrick Westfeld und Bernd Vahrenkamp arbeiten beim BSH; Dr. Gerhard Wübbena und Dr. Martin Schmitz bei der Geo++ Gesellschaft für satelliten-gestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH; Robert Schumann (Projektphase im LGLN) arbeitet heute bei der WSV; Christoph Wallat (Projektphase Geo++) arbeitet bei der Leica Geosystems GmbH.

*cord-hinrich.jahn@lgl.niedersachsen.de*

\* Das vorliegende Manuskript stellt die deutsche Fassung eines begutachteten Fachzeitschriftenartikels dar, der im November 2022 im *The International Hydrographic Review (IHR)* erschienen ist. Der Originaltitel lautet: »Development and Realisation of a Real-Time High Precision Positioning SSR-RTK Service for the North Sea Exclusive Economic Zone«. DOI: 10,58440/ihr-28-a16

in der Aufgabenerledigung des BSH, wie in küstenfernen Bereichen in der Nordsee hochgenaue Positionen, insbesondere in der Höhenkomponente, zuverlässig und präzise generiert sowie in Echtzeit bereitgestellt werden können.

Zur Lösung dieser Aufgabe sind zwei entscheidende Schlüsselfragen zu beantworten:

- Wie kann die Höhenkomponente hochgenau und zuverlässig in Echtzeit bestimmt werden?
- Wie können SSR-Korrekturdaten performant in das Messgebiet übertragen werden?

Erste Untersuchungen und Testmessungen zur Bestimmung von hochgenauen Höhenkomponenten im küstenfernen Bereich wurden bereits 2014 und 2015 von den hier berichtenden Projektpartnern durchgeführt und die grundsätzliche Eignung des SSR-RTK-Verfahrens wurde nachgewiesen (Ellmer 2013; Jahn et al. 2017). In der Fortsetzung dieser frühzeitigen Untersuchungs- und Testphase wurde in den Jahren 2020 bis 2022 das Forschungs- und Entwicklungsprojekt (F&E-Projekt) »SSR-RTK Korrekturdatendienst für hochgenaue Positionierung in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone in der Nordsee (AWZ) (Nordsee-Vernetzung)« durchgeführt (Jahn et al. 2021). Der vorliegende Aufsatz stellt die Ergebnisse dieses F&E-Projekts vor. Das Kernziel bestand darin, die seit 2015 erweiterten Modell- und Formatparameter (Geo++ 2020a) dieser innovativen SSR-RTK-Technologien zur hochgenauen und zuverlässigen Positionierung in der AWZ auf den Erfahrungen der bisherigen Zusammenarbeit zu verfeinern, um dessen gesamtes Potenzial praktisch zu erproben.

In diesem Zusammenhang hat das BSH die folgenden Qualitätsziele des F&E-Projekts definiert:

- Die Höhengenaugigkeit für die Position der Antenne im Bezugssystem ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) soll besser als 10 cm mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 % sein, was einer einfachen Messgenauigkeit von ca. 5 cm entspricht.
- Die Einlaufzeiten des Signals bis zum Erreichen der geforderten Genauigkeit sollen im Regelfall bei Erstinitialisierung weniger als 2 Minuten und nach Signalverlust weniger als 20 Sekunden für die Neupositionierung entsprechend oben genanntem Genauigkeitsziel betragen.
- Der Korrekturdatendienst soll im Zielgebiet

der AWZ der Nordsee eine hohe Verfügbarkeit bezüglich der Bereitstellung von Korrekturdaten haben.

- Das Format für die Korrekturdatenübertragung soll offen, lizenzfrei und dokumentiert sein.

Der zeitliche Ablauf des F&E-Projekts ist im Meilensteinplan der [Abb. 2](#) dargestellt. Im ersten Schritt wurden die Datenverbindungen zu den GNSS-Referenzstationen hergestellt, die Hardware zum Betrieb der Echtzeitvernetzung in der Cloud angemietet sowie die Konfiguration und Inbetriebnahme der Softwarekomponenten vorgenommen. Im weiteren Verlauf wurden Redundanzen aufgebaut sowie Maßnahmen zur Qualitätssicherung eingeführt. Testmessungen wurden an Land und auf See durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit und Performanz des Prototyps zu untersuchen und bewerten zu können.

## 2 Fachliche Grundsätze für die Prototypentwicklung

Für die hochgenaue Echtzeitpositionierung auf dem Niveau von einigen Zentimetern werden heute regelmäßig verteilte GNSS-Referenzstationen im Abstand von durchschnittlich 60 bis 100 Kilometern verwendet, die gemeinsam ein GNSS-Referenznetz bilden (Bauer 2018). Die Daten dieser Stationen werden mit einer Taktrate von 1 Hz über Netzwerke (z. B. Internet; Virtual Private Network, VPN) zusammengeführt. In dem echtzeitbetriebenen Ausgleichsprozess wird auf der Basis hochgenau bestimmter Stationskoordinaten und Satellitenbahnparameter der vollständige GNSS-Fehlerhaushalt modelliert und es werden entfernungsabhängige Terme beschrieben. Bestimmt werden im Wesentlichen Fehler der Satellitenbahnen und -uhren, Signalverzögerungen im Satelliten, ionosphärische Laufzeitänderungen, troposphärische Laufzeitverzögerungen, Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten, Empfänger-Uhrfehler und Signalverzögerungen. Die Repräsentation der fehlerbereinigten entfernungsunabhängigen Korrekturdaten erfolgt im Beobachtungsraum (Observation Space Representation, OSR) mittels Verfahren der Flächenkorrekturparameter (FKP), Virtueller Referenzstation (VRS) oder Master Auxiliary Concept (MAC). Der Nutzer verwendet die Korrekturdaten, um eigene Positionslösungen auf dem 1- bis 3-cm-Niveau für die Lage- und Höhenkomponente zu generieren. Diese Verfahren sind seit vielen Jahren etabliert, werden in Echtzeit angewendet und haben sich als robust erwiesen (Bauer 2018).

OSR-Verfahren erreichen ihre Grenzen durch die notwendigen bidirektionalen Kommunikationsverbindungen zwischen GNSS-Referenzstationen und Rovern. Die Limitierung derartiger Techniken ist nicht zuletzt durch die verwendete

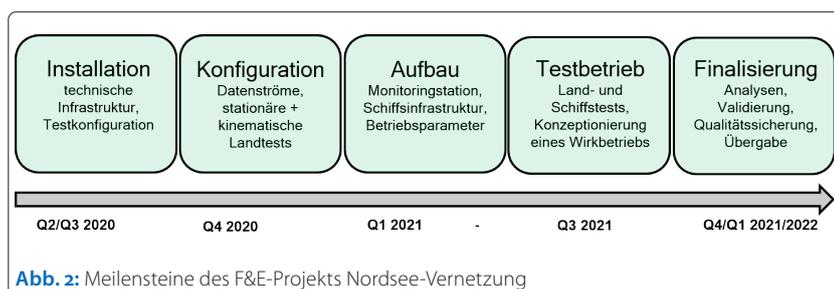
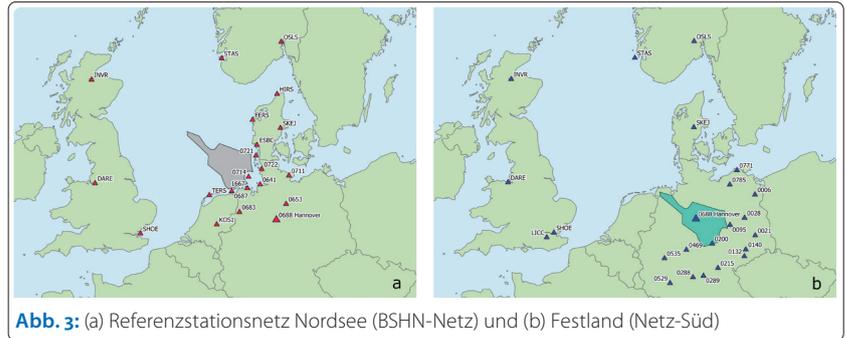


Abb. 2: Meilensteine des F&E-Projekts Nordsee-Vernetzung

Telekommunikation über mobiles Internet gegeben, bei der nur eine begrenzte Anzahl paralleler Kommunikationsverbindungen sinnvoll ist. Außerdem steigt die erforderliche Bandbreite der zu übertragenden Korrekturdaten mit der stark steigenden Anzahl von verfügbaren Satelliten, weil immer die Summe aller entfernungsabhängigen Fehlerkomponenten mit hoher Datenrate zum Nutzer übertragen wird (Wübbena et al. 2005, 2021). Um diese Grenzen zu beseitigen, haben Wübbena et al. (2005) das Verfahren PPP-RTK (Precise Point Positioning Real Time Kinematic) eingeführt, das systematische Fehler mit unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Eigenschaften modelliert und im Zustandsraum zur Positionierung eines einzelnen Empfängers performant bereitstellt. Mit der Veröffentlichung des SSRZ-Formats (Geo++ 2020b) hat die Firma Geo++ ein Format beschrieben, das eine Optimierung der zu übertragenden Datenmengen gewährleistet, broadcastfähige Kommunikationswege ermöglicht und für hochgenaue Anwendungen geeignet ist.

Das Verfahren ist eine grundlegende konzeptionelle Weiterentwicklung des Standard-PPP-Verfahrens (Bauer 2018). Die Ansätze für die SSR-Generierung, Parametrisierung, Formatierung und erzielbare Genauigkeit können unterschiedlich sein, aktuell existieren verschiedene Umsetzungen (z. B. SPARTN 2022; Hirokawa et al. 2021). Unter dem Begriff PPP-RTK wird oftmals eine Kombination von SSR-Parametern aus globalen und regionalen Berechnungen verstanden. Das im Rahmen dieses F&E-Projekts eingesetzte Verfahren bestimmt sämtliche SSR-Parameter konsistent und vollständig aus den GNSS-Daten der verwendeten Referenzstationen und wird durch die Software GNSMART der Firma Geo++ bereitgestellt (Geo++ 2020b).

Um die Vernetzungssoftware GNSMART durchgehend mit hoher Verfügbarkeit zu betreiben, wurde eine IT-Infrastruktur auf Basis cloudbasierter Server verwendet, die auf einer breitbandigen und unterbrechungsfreien Internetverbindung aufsetzt sowie eine leistungsfähige Hardwareausstattung besitzt. Erst eine performante Internetverbindung ermöglicht einen nach außen gerichteten Test- und Produktionsbetrieb, in dem die Beobachtungsdaten der verwendeten Referenzstationen in Echtzeit in den mathematischen Berechnungsprozess der Korrekturdatenbestimmung eingeführt sowie diverse Korrekturdatenströme an den Nutzer abgegeben werden können. Zudem muss eine 24/7-Fernwartung jederzeit und von jedem Standort mit Internetzugang für alle Beteiligten möglich sein, um kurzfristige Eingriffe im laufenden Betrieb zu ermöglichen und eine Optimierung der Softwareparameter vornehmen zu können. Gleichzeitig ist auch ein ungestörter



Betrieb mit einer hohen Ausfallsicherheit zu gewährleisten.

### 3 Design des GNSS-Referenzstationsnetzes und Vernetzungsberechnung

Innerhalb der AWZ der Nordsee sind gleichmäßig verteilte GNSS-Referenzstationen nicht gegeben. Deswegen werden in einem neuen Ansatz unregelmäßig verteilte GNSS-Referenzstationen in einem weit- und einem engmaschigen Netz kombiniert. Die unterschiedlichen Entfernungen innerhalb des Netzes (Abb. 3a) entsprechen im dichten Netzteil denen des deutschen SAPOS-Netzes, ergänzt um Stationen in Dänemark und den Niederlanden; im weitmaschigen Teil des Netzes, mit Stationen in Großbritannien und Südnorwegen ergeben sich Entfernungen bis zu 900 km.

Da Schiffszeiten für maritime Testmessungen aus wirtschaftlichen Gründen nur in begrenztem Maße zur Verfügung stehen, wurde ein zweites Vernetzungsgebiet (Netz-Süd, Abb. 3b) eingerichtet und in Betrieb genommen. Dieses Testgebiet zeichnet sich dadurch aus, dass es quasi ein nach Süd-Osten verschobenes Netzdesign des BSHN-Netzes darstellt (Abb. 3a). Dadurch konnte das vermeintliche Gebiet der AWZ in der Nordsee vollständig auf Land nachgebildet werden und stand für die gesamte Projektlaufzeit für unterschiedlichste Testmessungen zur Verfügung.

Innerhalb des Netzes-Süd wurde eine Station als Monitoringstation eingerichtet und dauerhaft für Validierungsaufgaben betrieben. Die Monitoringstation ermöglicht diverse Untersuchungen unterschiedlicher Empfänger und Kommunikationstests, diente aber vor allem der Qualitätssicherung der Vernetzung und der Softwarelösung in einer 24/7/365-generierten Koordinatenzeitreihe (vgl. Abb. 7).

Wichtige Parameter für einen zuverlässigen und präzisen Betrieb einer Vernetzung sind hochgenaue verfügbare Koordinaten der am Prozess beteiligten Referenzstationen. Dabei handelt es sich im Sinne der Ausgleichsrechnung um Initialparameter, die im Gesamtprozess (Kalman-Filter) mit anderen Modellparametern geschätzt werden. Die Koordinaten der im Netz befindlichen GNSS-Referenzstationen (SAPOS, EUREF, SDFE) lagen in

unterschiedlichen Realisierungen vor und wurden zu Beginn des F&E-Projekts in einem einheitlichen Koordinatenrahmen (ETRS89/DREF91) neu ausgeglichen und mit einer geringen A-priori-Standardabweichung (1 mm) für alle Referenzstationen in die weiteren Berechnungen eingeführt. Dieser Koordinatenrahmen spezifiziert das amtliche deutsche Referenzsystem ETRS89/DREF91.

Die Software GNSMART (GNSS State Monitoring And Representation Technique) bestimmt aus einem Netz von GNSS-Referenzstationen den Zustand (State Space) einzelner GNSS-Fehlerkomponenten wie beispielsweise Parameter der troposphärischen Laufzeitverzögerung (State Monitoring) und stellt GNSS-Korrekturdaten in unterschiedlichen Formaten bereit (Representation). GNSMART verarbeitet undifferenzierte GNSS-Beobachtungen unterschiedlicher GNSS-Signale simultan in einer Multifrequenz-, Multisignal-, Multi-GNSS-Ausgleichung. Die Eingangsparameter von GNSMART sind neben den Stationskoordinaten auch Empfänger- und Antenneninformationen, Kalibrierungen und Metadaten, aber auch Satellitenantennenparameter (igs14.atx) und präzise Satellitenorbits (CODE 2022). Aus den Multifrequenz- und Multisignaldaten der Satelliten und den genannten Eingangsparametern werden die Phasenmehrdeutigkeiten bestimmt und in GNSMART festgesetzt, daraus werden Korrekturparameter generiert und dem Nutzer über Ntrip (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) an definierten Übergabepunkten (sogenannten SSRZ-Mountpoints) bereitgestellt. Diesen Berechnungsvorgang nennt man Vernetzung. In Bezug auf die Referenzstationsnetze (Abb. 3) werden hier auch die Begriffe BSHN-Vernetzung und Netz-Süd verwendet.

Im Rahmen des Nordsee-Projekts hat sich gezeigt, dass auch spezielle Anpassungen der Konfiguration der SSR-Korrekturen, z. B. hinsichtlich der Interpolation des atmosphärischen Fehlerhaushalts, erforderlich waren. Dieses rührte einerseits von der ansteigenden Sonnenaktivität und des da-

raus erwachsenen Einflusses auf die GNSS-Daten her, andererseits erfordert besonders die heterogene Netzstruktur dieses Projekts (kurze Stationsentfernungen an der Küste, lange Stationsentfernungen im Bereich der Nordsee) eine gesonderte Fehlermodellierung.

#### 4 Aufbau, Betrieb und Ergebnisse der Monitoringstation

Im Winter 2020/2021 wurde innerhalb des Netzes Süd (Abb. 3b) eine Monitoringstation aufgebaut. Diese besteht aus einer GNSS-Antenne vom Typ Leica AR25.R4 mit LEIT-Radom. Die Antenne ist über einen Antennensplitter mit zwei Septentrio AsteRx SB verbunden (Abb. 4) und ermöglicht damit die Koordinatenbestimmung gemäß einer Zero-Baseline. Die amtlichen Koordinaten im System ETRS89/DREF91 dienen als Sollwerte und als Referenz der Messungen mit der Monitoringstation. Diese Station simuliert mit großen Punktabständen zu benachbarten Referenzstationen von bis zu 190 km einen Dauernutzer in einem vergleichbaren Testgebiet zur AWZ und ermöglicht mittels Sollwerten eine kontinuierliche Überprüfung des Lösungsstatus und der Performanz der Koordinatenberechnung im Netz-Süd.

Gegenwärtig steht eine direkte Verarbeitung der SSR-Korrekturdaten nur in Prototyp-Konfigurationen bereit, handelsübliche GNSS-Empfänger verfügen derzeit noch nicht über eine erforderliche Schnittstelle. Somit war eine Formatumwandlung auf einem Notebook erforderlich. Die Konvertierungssoftware *ssr2obs* für die Umrechnungen vom Zustands- in den Beobachtungsraum wurde dafür von der am Projekt beteiligten Firma Geo++ bereitgestellt. Im Zielkonzept eines zukünftigen broadcastfähigen SSR-Dienstes werden die Korrekturdaten direkt im GNSS-Empfänger verarbeitet. Dazu muss idealerweise ein Format im internationalen RTCM-Standard verfügbar sein. Außerdem muss dieses Format auf der Seite des Rovers in der Firmware (Rover-Engine) verarbeitet werden können. Der Rover wäre dann in der Lage, eine absolute Position seiner Antenne zu bestimmen, ohne direkte Nutzung von Daten einer GNSS-Referenzstation.

Eine durchgreifende Bewertung der Ergebnisse aus den Daten der Monitoringstation erfolgt im Vergleich der SSR-RTK-Lösungen aus dem Netz-Süd mit den herkömmlichen Korrekturdaten des SAPOS-HEPS-Dienstes (Referenzlösung im Koordinatenraum).

Abb. 5 zeigt dazu exemplarisch Koordinatenzeitreihen für die Höhen- und die Lagekomponenten eines ausgewählten Tages im Jahr 2021 (DOY, Day-Of-Year). Die Differenzen liegen nahezu ausnahmslos im Erwartungsbereich von wenigen Zentimetern und bestätigen die vollständige Modellierung des Fehlerhaushalts für diesen Untersuchungszeit-

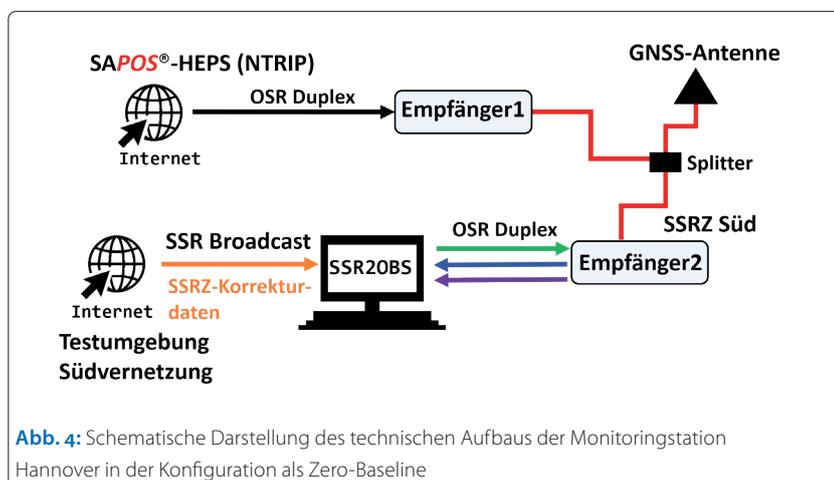


Abb. 4: Schematische Darstellung des technischen Aufbaus der Monitoringstation Hannover in der Konfiguration als Zero-Baseline

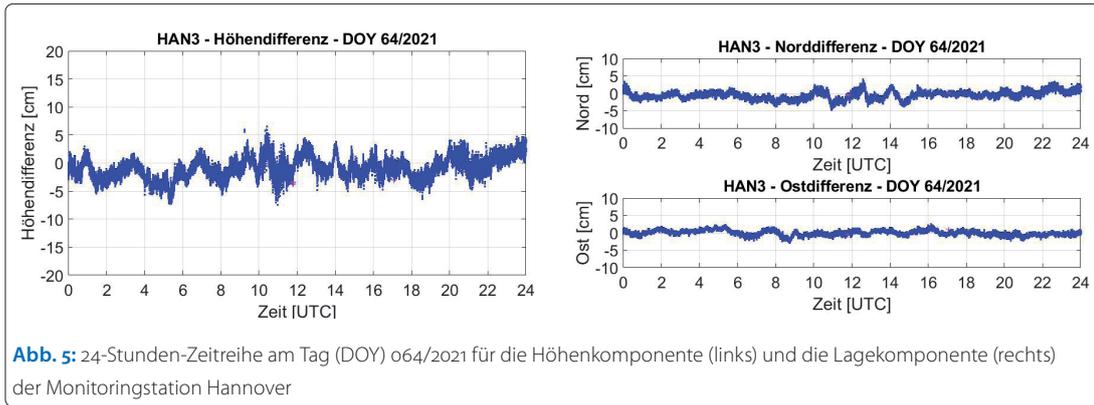


Abb. 5: 24-Stunden-Zeitreihe am Tag (DOY) 064/2021 für die Höhenkomponente (links) und die Lagekomponente (rechts) der Monitoringstation Hannover

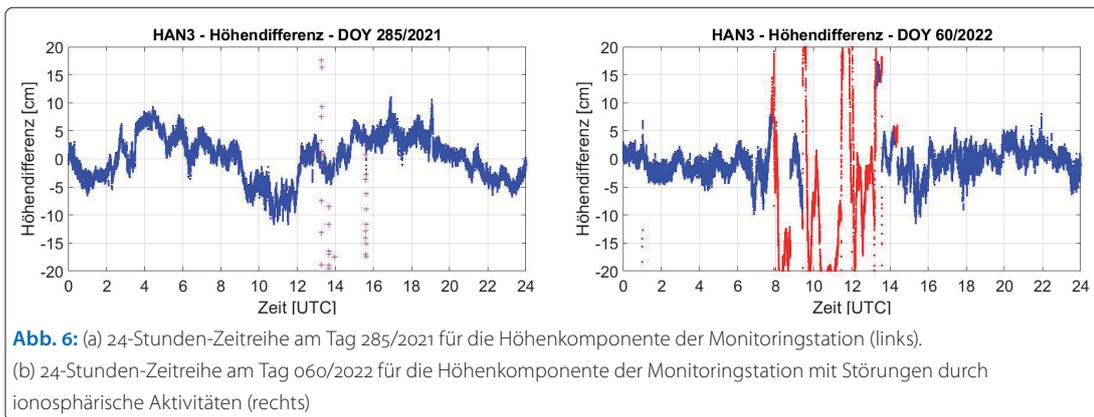


Abb. 6: (a) 24-Stunden-Zeitreihe am Tag 285/2021 für die Höhenkomponente der Monitoringstation (links).  
(b) 24-Stunden-Zeitreihe am Tag 060/2022 für die Höhenkomponente der Monitoringstation mit Störungen durch ionosphärische Aktivitäten (rechts)

raum. Der grundsätzlich Funktionsstatus der Monitoringstation wurde durch tägliche Überwachung des Betriebszustands und der täglichen Koordinatenvergleiche mit den Sollkoordinaten realisiert. Im Dauerbetrieb der Station konnte zwischen 2021 und 2022 gezeigt werden, dass es in unregelmäßigen Abständen zu stärkeren Systematiken in den Koordinatenvergleichen kam, deren Ursachen vorrangig auf atmosphärische Einflüsse zurückzuführen ist.

Die aufgetretenen mittleren bis starken systematischen Effekte durch atmosphärische Störungen schlagen auf die Korrekturdaten durch. Die Koordinatendifferenzen in Abb. 6a waren beeinflusst durch regionale Starkregengebiete, die gehäuft an diesem Tage auftraten, wohingegen die Daten, die den Differenzen der Abb. 6b zugrunde lagen, durch starke ionosphärische Störungen in den Mittagsstunden des Untersuchungstages beeinflusst waren. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Daten aus unregelmäßig verteilten Referenzstationen mit Abständen von teilweise mehreren hundert Kilometern stammen. Die Bedingungen für die genaue Erfassung des GNSS-Fehlerhaushaltes unterscheiden sich damit grundlegend von denen in dichtabständigen Referenzstationsnetzen.

Wertet man die Daten der Monitoringstation Hannover für das Jahr 2021 statistisch aus, so ergeben sich durchschnittliche Qualitätsinformationen für das gesamte Jahr. In Abb. 7 sind

die gemittelten Abweichungen pro Tag für die Höhenkomponente aufgetragen. Entfernt wurden die Tage mit Systemwartungen, Umbauten oder Modellanpassungen auf der Seite der Vernetzung. Deutlich zu erkennen ist, dass der überwiegende Anteil der Lösungen im Erwartungsbereich liegt und für den Koordinatenraum ein wesentliches Ergebnis dieser Projektstudie nachweist. Wertet man den RTK-Status fix für die Datenreihe der Abb. 7 aus, so liegen 72,6 % aller Lösungen im Bereich zwischen 90 und 100 %, weitere 14,4 % liegen zwischen 80 und 90 % und 7,5 % liegen zwischen 70 und 80 %. Damit bestätigt diese Langzeituntersuchung die hohe Qualität des Projektergebnisses.

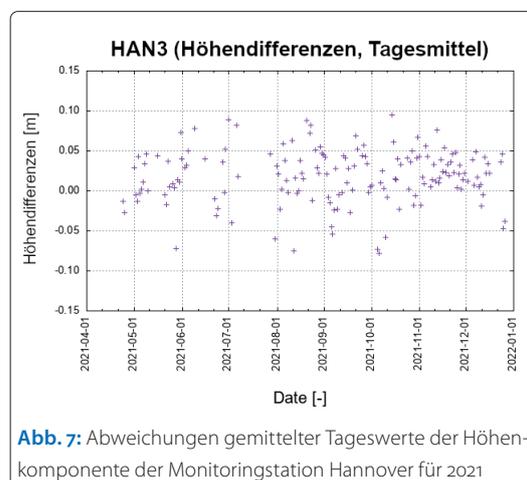
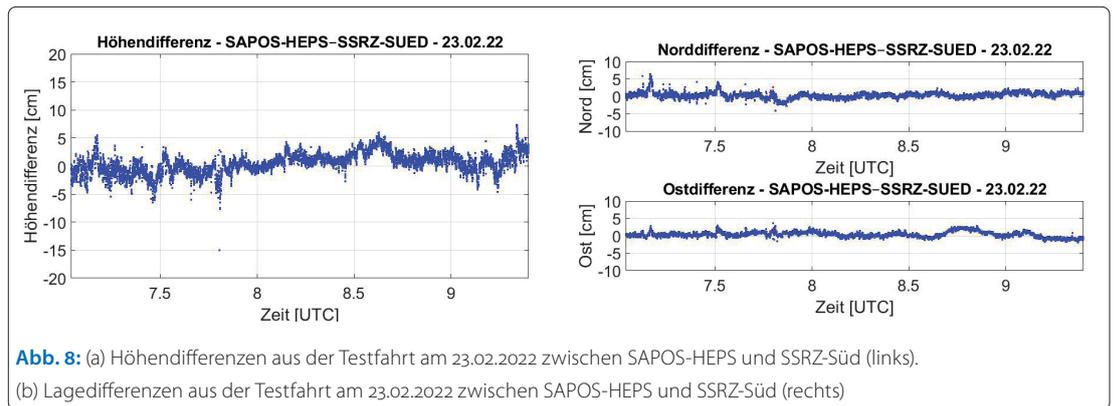


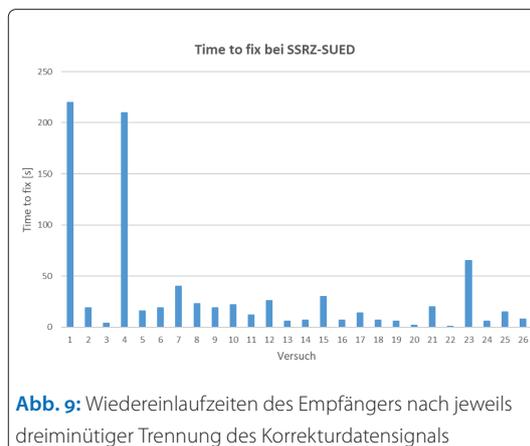
Abb. 7: Abweichungen gemittelter Tageswerte der Höhenkomponente der Monitoringstation Hannover für 2021



## 5 Ergebnisse kinematischer Tests an Land

Die in Abschnitt 4 dargestellten Ergebnisse stammen aus statischen Messungen und bestätigen die grundsätzliche Funktionalität des SSR-RTK-Prototyps. Zur Überprüfung der Qualität bei kinematischen Anwendungen und damit zur Überprüfung einer schiffsnahen Simulation der Messungen wurde eine GNSS-Rover-Antenne am höchsten Punkt eines Fahrzeugs abschattungsfrei montiert. Um die Nutzung von Korrekturdatenströmen zu ermöglichen, wurde eine mobile Internetverbindung mittels eines mit einem Notebook verbundenen LTE-Modems aufgebaut und somit ein robuster Kommunikationskanal erzeugt. Über einen WLAN-Hotspot im Fahrzeug wurden die GNSS-Empfänger mit Korrekturdaten (SSRZ-Süd) versorgt. Da im kinematischen Modus keine Sollkoordinaten in Echtzeit verfügbar sind, wurde auch hier mit dem Zero-Baseline-Verfahren gearbeitet und die Vergleiche im Koordinatenraum zwischen der SAPOS-HEPS-Lösung (Sollkoordinaten) und der SSRZ-Lösung aus dem Netz-Süd berechnet. Die Fahrzeuggeschwindigkeit an Land (20 km/h) wurde an die eines Messschiffs angepasst und es wurde ein völlig abschattungsfreies Messgebiet gewählt, um Vergleichsbedingungen für einen Echtbetrieb auf See zu erreichen.

Abb. 8a und Abb. 8b zeigen Differenzen des kinematischen Koordinatentests für die Höhen-



komponente und für die Lagekomponenten. Die Referenzlösung (Solllösung) basiert auf dem dichtesten HEPS-Netz von Referenzstationen mit der kürzesten Entfernung von 15 km. Im Netz, das die Grundlage der SSR-Lösung bildet (Abb. 3b), betrug der Abstand zur nächsten Referenzstation rund 190 km. Die Differenzen in Abb. 8a und Abb. 8b übertreffen die Qualitätsziele des Projekts: So wurde für die Höhenkomponente mit einer Standardabweichung von 1,8 cm eine sehr hohe GNSS-RTK-Genauigkeit erzielt, obwohl die Netzkonfiguration hochgradig inhomogene Stationsabstände aufweist. Die Empfänger, deren Lösungen in Abb. 8a und Abb. 8b dargestellt sind, befanden sich während des Testzeitraums nahezu vollständig (zu über 99,9 %) im RTK-Status fix.

Im Rahmen der kinematischen Tests an Land wurde auch das Qualitätskriterium »Einlaufzeiten des Signals bis zum Erreichen der geforderten Genauigkeit« überprüft (Abb. 9). Dazu wurde in fest definierten Abständen die Kabelverbindung von Antenne und Empfänger während der Fahrt für jeweils drei Minuten getrennt, was einem vollständigen Signalabbruch entsprach. Der GNSS-Empfänger, der als Referenzlösung die Sollpositionen lieferte, wurde dagegen nicht unterbrochen, sondern lieferte kontinuierliche Positionslösungen.

Die gemessenen Wiedereinlaufzeiten der Positionslösungen zeigen die Zeit bis zur Re-Initialisierung des GNSS-Empfängers im kinematischen Messungsmodus. Die Datenreihe in Abb. 9 liegt im Durchschnitt bei 31,7 Sekunden. Ohne nähere Betrachtung der beiden Ausreißer über 200 Sekunden, deren Ursache nicht gefunden wurde, sinkt dieser Wert auf 15,5 Sekunden und bestätigt eindrucksvoll das Qualitätsziel, dass innerhalb eines inhomogenen Netzes von Referenzstationen Initialisierungszeiten erreicht werden konnten, die bisher nur in statischen Anwendungen in Netzen mit kurzen Abständen zwischen den Referenzstationen möglich waren. Es zeigte sich während der Feldversuche weiterhin, dass trotz kompletter Signalabbrüche über mehrere Minuten sehr kurze Wiedereinlaufzeiten von sogar nur wenigen Sekunden Dauer möglich sind.

## 6 Schiffstest auf VWFS WEGA

Im September und Oktober 2021 wurden zwei Testfahrten mit dem Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiff (VWFS) *WEGA* des BSH durchgeführt (Abb. 10). Die Grundinstallation der geodätischen Messgeräte und Kommunikationsanlagen erfolgte vor der ersten Testfahrt, die dem allgemeinen Aufbau aller geodätischen Komponenten, der grundsätzlichen Überprüfung der Kommunikationseinrichtungen (LTE- und VSAT-Anlage) und einer ersten Testfahrt in die Nordsee diente. Die Übertragung der GNSS-Korrekturdaten erfolgt einerseits mittels LTE, dessen Netzabdeckung geringfügig in den küstennahen Bereich reicht, während andererseits für den küstenfernen Empfang der GNSS-Korrekturdaten die schiffseigene maritime satellitengestützte VSAT-Anlage eingesetzt wurde. Im Oktober 2021 erfolgte die einzige Messfahrt in das Zielgebiet der AWZ Nordsee. Ein erweitertes Testszenario war unter den vorherrschenden Corona-Bedingungen nicht umsetzbar, sodass insgesamt in diesem Projekt nur eine einzige echte Testfahrt in das Zielgebiet möglich war.

Der Aufbau der GNSS-Empfänger, Notebooks und Kommunikationseinrichtungen auf VWFS *WEGA* wurde gemäß Abb. 10 und Abb. 11 vorgenommen. Während der Schiffstests wurden weitgehend gleiche Empfängertypen verwendet (Septentrio AsteRx SB, AsteRx U), die einheitlich konfiguriert und betrieben wurden. Dieses ist notwendig, um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse der eingesetzten geodätischen Sensoren zu erreichen. Alle GNSS-Empfänger, die im Rahmen des F&E-Projekts verwendet wurden, sind über einen Antennensplitter mit einer auf dem Peildeck des VWFS *WEGA* befestigten GNSS-Antenne verbunden worden. Damit sind die Messungen der beiden Schiffseinsätze, genauso wie die der kinematischen Landtests, im Zero-Baseline-Modus erfolgt. Die in Abb. 11 dargestellte Leica-Topp-Antenne wurde nur für ein kurzes Experiment verwendet.

Die Notebooks, die die Korrekturdatenströme aus der BSHN-Vernetzung empfangen haben, waren wie bei den kinematischen Landtests mit der Software *ssr2obs* ausgestattet, um die SSR-Korrekturdaten in das empfängerseitige OSR-Format zu wandeln. Ein drittes Notebook wurde für den Empfang der HEPS-Korrekturdaten verwendet, der für den küstennahen Bereich eine Vergleichslösung bereitstellte. Auf dem VWFS *WEGA* wird der Fugro-Korrekturdatendienst (Fugro Marinestar G4+, Fugro 2022) als Standard-Positionierungsservice eingesetzt. Damit bestand die Möglichkeit zu Vergleichen auch mit diesem Dienst.

## 7 Ergebnisse aus den Schiffstests im September und Oktober 2021

Die Untersuchungen im September 2021 dienten den grundsätzlichen Funktionstests der geodäti-



Abb. 10: VWFS *WEGA* des BSH mit den für die Testfahrten relevanten Antennen im September 2021

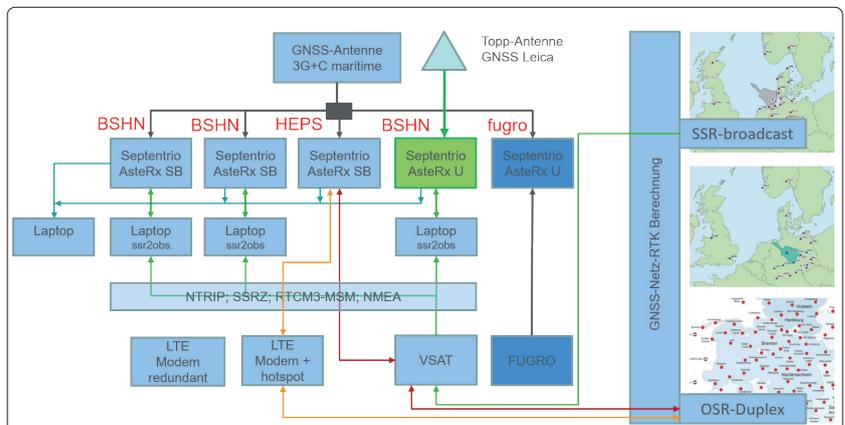
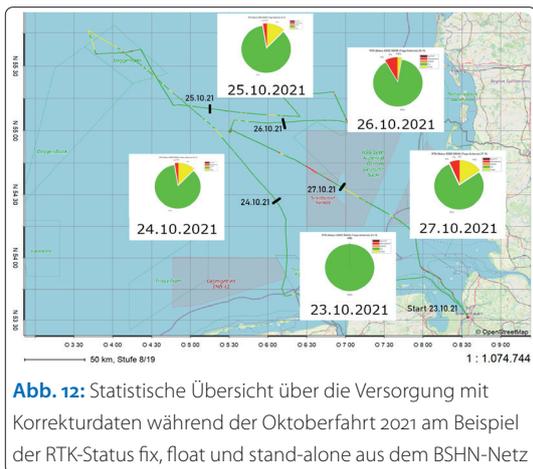


Abb. 11: Konfiguration der GNSS-Empfänger, Notebooks und Kommunikationseinrichtungen auf dem VWFS *WEGA* während der Testfahrt im Oktober 2021

schen Empfänger und der Kommunikationseinrichtungen. Es wurden zahlreiche Unterbrechungen der Internetverbindungen sowohl bei den LTE-Modems als auch bei der VSAT-Anlage simuliert und deren Auswirkungen auf die Performanz des Wiederaufbaus der Datenverbindung und der Koordinatenlösungen im Beobachtungsraum analysiert. Von Interesse war dabei auch die Schnelligkeit der Re-Initialisierung der Koordinatenlösung. Bei allen Tests wurden nach Wiederherstellung der Verbindungen die Zeiten gemessen, bis der RTK-Status fix wieder erreicht wurde. In allen Fällen blieben die Re-Initialisierungszeiten unter 30 Sekunden. Lediglich bei den Tests, bei denen die Stromversorgung der Empfänger unterbrochen wurde, erfolgte die Re-Initialisierung erst nach dem Kaltstart der Empfänger, mithin deutlich über 30 Sekunden.

### 7.1 Verfügbarkeit von GNSS-Korrekturdaten im Zielgebiet der AWZ

Abb. 12 zeigt eine Übersicht der Versorgung des VWFS *WEGA* mit Korrekturdaten während der gesamten Messfahrt im Oktober 2021. Dargestellt



**Abb. 12:** Statistische Übersicht über die Versorgung mit Korrekturdaten während der Oktoberfahrt 2021 am Beispiel der RTK-Status fix, float und stand-alone aus dem BSHN-Netz

sind die durchschnittlichen Werte der RTK-Status fix (grün), float (gelb) und stand-alone (rot). Die Daten wurden der Registrierung der GNSS-Antenne auf dem Peildeck entnommen, die Korrekturdaten wurden über die VSAT-Anlage aus dem BSHN-Netz registriert. In der [Tabelle 1](#) sind die korrespondierenden Zahlenwerte zur [Abb. 12](#) nachgewiesen.

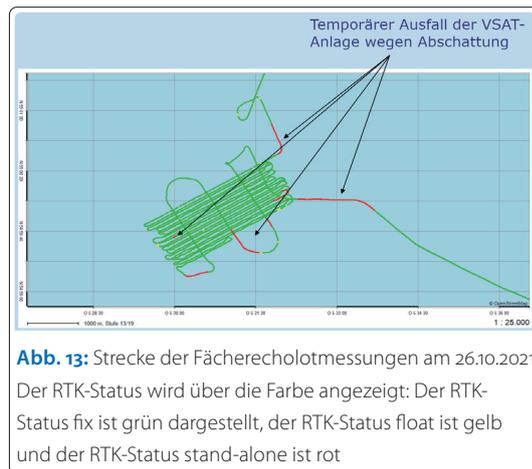
Mit durchschnittlich 87,4 % aller RTK-fix-Lösungen für die gesamte Messfahrt wurde ein sehr hoher Qualitätsstandard erreicht. Am 24. Oktober 2021 wurde die äußerste Spitze der AWZ befahren. Die geringere Anzahl der RTK-Status-fix-Daten ist darauf zurückzuführen, dass zu diesem Zeitpunkt eine zu geringe Interpolationslänge für die ionosphärischen und troposphärischen Korrekturen im Konverter *ssr2obs* eingestellt war, bedingt durch die größeren Entfernungen zu den nächsten GNSS-Referenzstationen. Nach Abgleich der Parameter im Konverter mit den vorliegenden Stationsentfernungen konnte der Empfänger die Mehrdeutigkeiten lösen und in den RTK-Status fix wechseln. [Tabelle 1](#) zeigt sehr deutlich, dass die grundsätzliche Versorgung mit Korrekturdaten im Zielgebiet der AWZ während dieser Messfahrt sehr hoch gewesen ist. In weit über 90 % der Fälle konnte während der gesamten Fahrt an Bord das Internet über die VSAT-Anlage erreicht werden.

### 7.2 Untersuchungen zur Datenkommunikation

Sowohl während der September-, als auch während der Oktoberfahrt 2021 wurden die Emp-

	RTK fix	RTK float	stand-alone
23.10.2021	98 %	2 %	< 1 %
24.10.2021	77 %	21 %	2 %
25.10.2021	88 %	9 %	3 %
26.10.2021	86 %	7 %	8 %
27.10.2021	88 %	9 %	4 %

**Tabelle 1:** Statistik über die Versorgung mit Korrekturdaten während der Oktoberfahrt 2021 am Beispiel der RTK-Status fix, float und stand-alone aus dem BSHN-Netz



**Abb. 13:** Strecke der Fächerecholotmessungen am 26.10.2021. Der RTK-Status wird über die Farbe angezeigt: Der RTK-Status fix ist grün dargestellt, der RTK-Status float ist gelb und der RTK-Status stand-alone ist rot

fangseigenschaften der an Bord des VWFS *WEGA* installierten VSAT-Anlage untersucht. Während verschiedener Wendemanöver wurden Auswirkungen unterschiedlicher Richtungsazimute des VWFS *WEGA* (heading) auf den Empfang der BSHN-Korrekturdaten über die VSAT-Anlage detektiert. Bei einem Nordazimut von 140° (ca. ±5°) kam es zu teilweise vollständigen Abrissen der Kommunikationsverbindungen. Es zeigte sich, dass die Umschaltung zwischen der Primär- und der Sekundäranenne nicht störungsfrei erfolgt ([Abb. 10](#)). Aufgrund der Erkenntnisse dieser Testfahrt wurde die Konfiguration der Satellitenkommunikationsanlage angepasst, sodass nunmehr ein fehlerfreier Betrieb sichergestellt ist.

Am 26. Oktober erfolgte bei der Testfahrt mit dem VWFS *WEGA* eine mehrstündige Fächerecholotvermessung. Dabei wurde das Messgebiet so geplant, dass die Auswirkungen der oben beschriebenen Kommunikationsstörungen vor der Neukonfiguration der Anlage minimiert werden konnten. Der Fahrtverlauf und der RTK-Status sind beide in [Abb. 13](#) nachgewiesen und zeigen, dass weit über 90 % aller Lösungen im RTK-Status fix lagen. Während des gesamten Messzeitraums liefen die GNSS-Empfänger mit den verschiedenen Korrekturdatenströmen.

### 7.3 Untersuchungen über Abschattungen und Signalstörungen durch Schiffsaufbauten

Während der Liegezeit im Hafen wurden die Auswirkungen von Abschattungen des Antennenmastes auf den Empfang der GNSS-Signale untersucht. Eine GNSS-Antenne wurde im Abschattungsbereich des Mastes montiert und die Daten aller GNSS registriert. In [Abb. 14](#) zeigt ein Foto mit einem Fisheye-Objektiv aus der Perspektive der GNSS-Antenne den Antennenmast des VWFS *WEGA* und die Sekundäranenne der VSAT-Anlage (in gleicher Orientierung wie [Abb. 15](#)). Auf der Basis dieses technischen Aufbaus wurde das Signal-Rausch-Verhältnis (CNO) der Signale der L1-Frequenz an vier Tagen ausgewertet und die

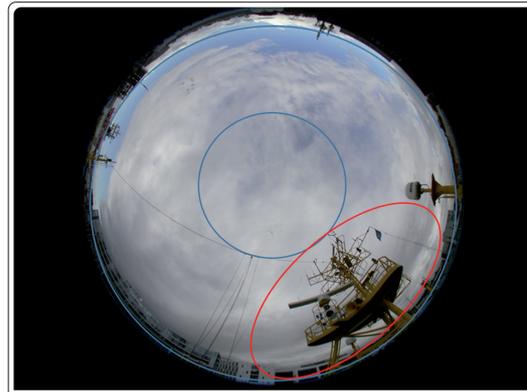
Abschattungen und Signalstörungen wurden analysiert. Die Abweichungen von einem mittleren CNO wurden auf  $\pm 6$  dB-Hz begrenzt, als Skyplot dargestellt und auf den Standort der GNSS-Antenne zentriert sowie orientiert.

In [Abb. 15](#) sind die CNO-Werte entlang der Satellitenspuren im Skyplot abgebildet. Man sieht sehr deutlich, dass es in einem mittleren Azimut von  $135^\circ$  zu starken Abschattungen und deutlichen Änderungen der Signalqualität kommt, hervorgerufen durch den Antennenmast. Auch die sekundäre VSAT-Antenne bildet sich im Skyplot bei einem mittleren Azimut von  $90^\circ$  ab. Die Effekte durch den Antennenmast reichen bis fast  $60^\circ$  Elevation, die der sekundären VSAT-Antenne bis knapp  $30^\circ$  Elevation. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass die GNSS-Signale bereits im Bereich der offenen Bauweise des Mastes so stark beeinflusst werden, dass sie verworfen werden sollten. Neben Abschattungen besteht das hohe Risiko von Signalbeugungen, die bei präzisen Anwendungen systematische Störungen der Ergebnisse hervorrufen können. Es ergibt sich somit ein nahezu vollständiger Verlust qualitativ guter Signale in diesen Bereichen. Die Montage der GNSS-Antennen an störungsfreien oder zumindest an störungsarmen Standorten eines Schiffs sollte demnach immer favorisiert werden.

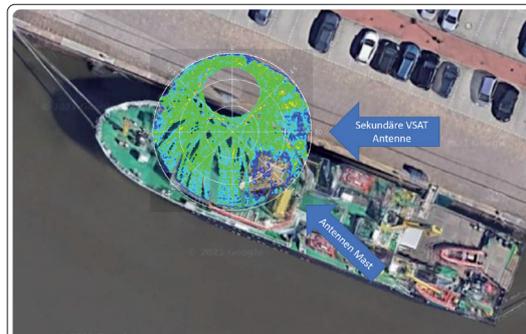
## 8 Ergebnisse im Koordinatenraum

Ein wesentliches Ziel dieses F&E-Projekts war die Entwicklung eines GNSS-basierten Echtzeit-Verfahrens zur Bereitstellung hochgenauer Höhenkoordinaten im Testgebiet der AWZ. In [Tabelle 1](#) wurde bereits gezeigt, dass der RTK-Status fix zu knapp 90 % erreicht werden konnte. Schwieriger ist es, eine belastbare Referenz für den Vergleich der Höhenkoordinaten aus dem BSHN-Netz abzuleiten. In diesem Projekt wurden folgende Korrekturdatendienste genutzt, um Vergleichswerte zu generieren:

- SAPOS-HEPS im küstennahen Bereich innerhalb der durch Referenzstationen überdeckten Fläche,
- SAPOS-HEPS außerhalb der durch Referenzstationen überdeckten Fläche (Korrekturdaten werden extrapoliert),
- Fugro Marinestar 4G+.

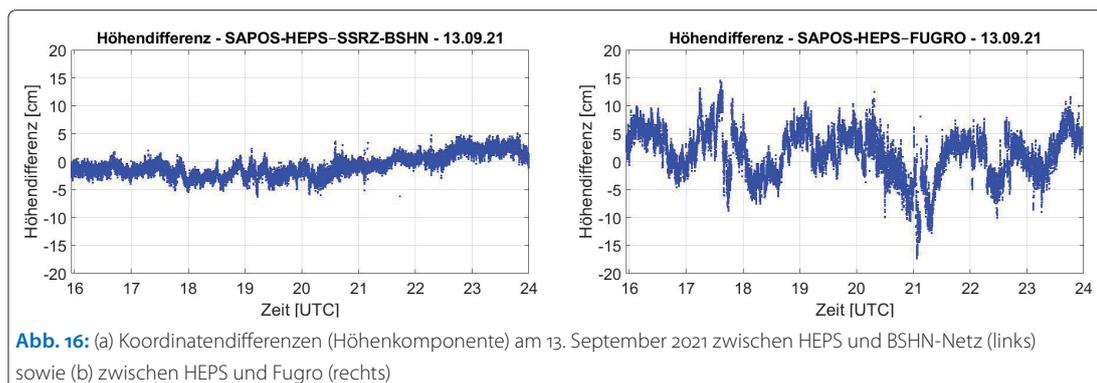


**Abb. 14:** Skyplot mit Fisheye-Objektiv aus der Perspektive der GNSS-Antenne auf dem Peildeck des VWFS WEGA

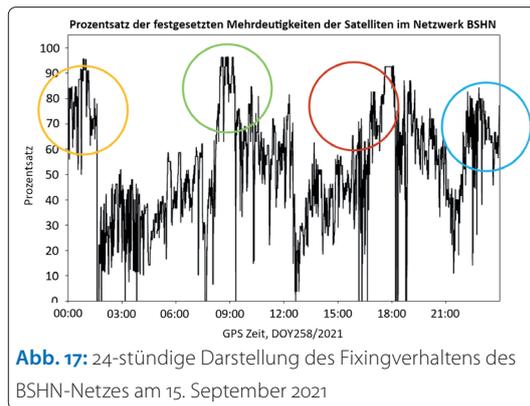


**Abb. 15:** Abschattung durch den Antennenmast des VWFS WEGA und der Primäranterie der VSAT-Anlage am Beispiel von Multi-GNSS-L1-Frequenzen

Im September wurden zunächst Vergleiche im küstennahen Bereich durchgeführt. Mit GNSS-Korrekturdaten des BSHN-Netzes wurden Höhenkoordinaten des VWFS WEGA (GNSS-Antenne maritim, [Abb. 10](#)) im Abstand von 120 km zur nächsten Referenzstation bestimmt und mit Höhenkoordinaten aus den Diensten SAPOS-HEPS ([Abb. 16a](#)) und Fugro Marinestar 4G+ ([Abb. 16b](#)) verglichen. Während die BSHN- und HEPS-Vergleiche innerhalb der Erwartungen liegen (RMS von etwa 2 bis 3 cm, maximale Amplituden von 5 cm), streuen die HEPS- und Fugro-Vergleiche deutlich stärker mit Amplituden zwischen  $\pm 15$  cm. Lösungen aus dem Fugro-Dienst erreichen im vorliegenden Fall nicht die Qualität, die als Referenz erforderlich ist.



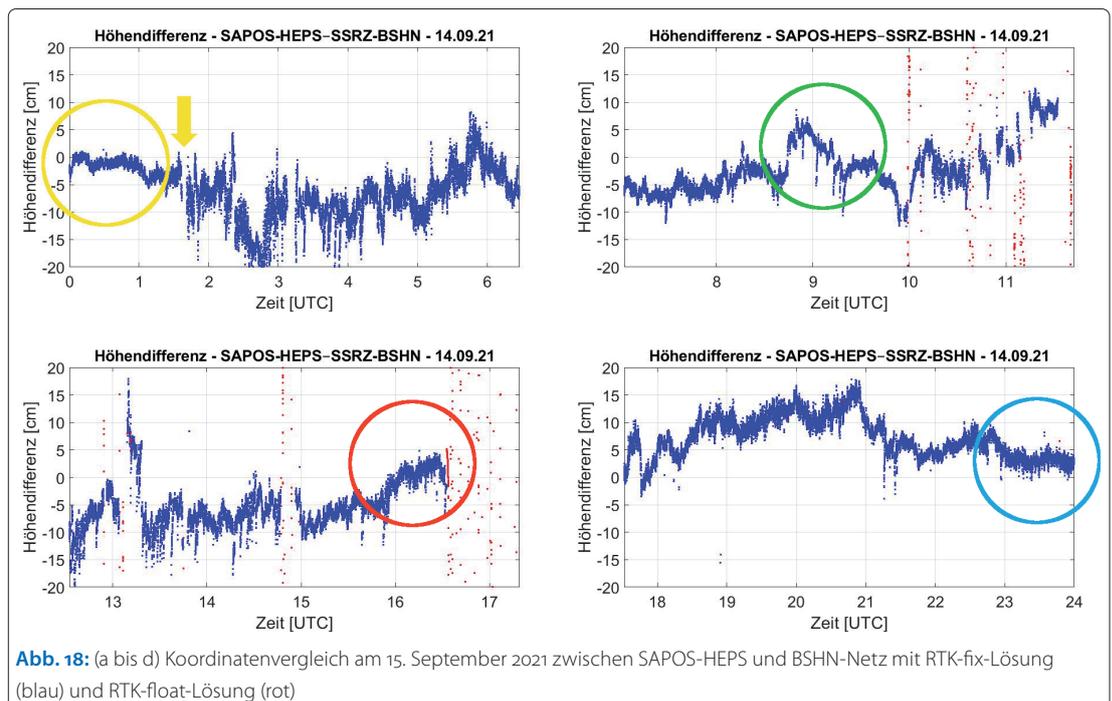
**Abb. 16:** (a) Koordinatendifferenzen (Höhenkomponente) am 13. September 2021 zwischen HEPS und BSHN-Netz (links) sowie (b) zwischen HEPS und Fugro (rechts)



Die Berechnung von SSR-Korrekturdaten aus dem BSHN-Netz erfolgt in der Software GNSMART. Neben den Korrekturdaten werden auch umfangreiche Qualitätsinformationen bereitgestellt, die zur Beurteilung der Betriebsperformanz herangezogen werden können. [Abb. 17](#) zeigt eine 24-stündige Darstellung der im GNSMART-Berechnungsprozess festgesetzten Mehrdeutigkeiten der GNSS-Satelliten am 15. September 2021. Die farbigen Kreise markieren die Bereiche, in denen die Mehrdeutigkeiten einer großen Anzahl von Satelliten festgesetzt wurden. Die Markierungen korrespondieren mit denen in [Abb. 18](#), die Koordinatenvergleiche zwischen den Lösungen aus dem BSHN-Netz und aus dem HEPS-Dienst zeigt. Einerseits ist eine hohe Korrelation zwischen der Anzahl gefixter Satelliten ([Abb. 17](#)) auf der Netzseite und den geringen Koordinatendifferenzen zwischen HEPS und BSHN im Erwartungsbereich zu erkennen, andererseits liegt eine schwache Korrelation zwischen den Änderungen im Fixingverhalten der Mehrdeutigkeiten auf der Netzseite

und dem periodischen Verhalten der Koordinatendifferenzen vor. Dieses lässt auf nicht modellierte Restfehler schließen, deren Ursachen in atmosphärischen Einflüssen und darauf basierenden kurzfristigen Änderungen der Ionosphäre und Troposphäre, insbesondere im Bereich der Nordsee, einem unzureichenden Stationsdesign, das zu Mehrwegeeffekten führen kann, sowie fehlenden oder unzureichenden Antennenkalibrierungen auf internationalen Stationen zu suchen sind. Die in [Abb. 18b](#) und [Abb. 18c](#) erkennbaren Ausfälle in den Koordinatenvergleichen (RTK-float-Lösung, rot) haben ihre Ursache in Wendemanövern des VWFS WEGA, die zu Untersuchungen der Kommunikationsanlagen an Bord durchgeführt wurden.

Die Referenzlösung, die im F&E-Projekt verwendet wurde, basiert auf den Korrekturdaten des HEPS-Dienstes. Dieser liefert zuverlässige Korrekturdaten aus den Gebieten, die vollständig von Referenzstationen umgeben sind. Außerhalb dieser Überdeckungszone können Korrekturdaten nur präzisiert werden und verringern sich in ihrer Güte, je größer die Abstände zu den Randbereichen des Überdeckungsgebietes werden. Das Zielgebiet der AWZ liegt deutlich außerhalb des Gebietes des HEPS-Dienstes. Somit konnte während der Oktoberfahrt lediglich am ersten Messstag, 23. Oktober 2021, zwischen 0 und 17 Uhr UT (küstennahe Messfahrt mit Maximalabständen von Schiff zu Küste von 60 km) mit einem verlässlichen Referenzdatensatz verglichen werden. Dieser Vergleich ist in [Abb. 19b](#) dargestellt. Nach Fahrtbeginn gegen 12 Uhr UT und Parallelfahrt entlang der Küste wurde das HEPS-Gebiet um etwa 17 Uhr UT verlassen. Die sehr guten Ergebnisse zwischen 0 und 15 Uhr UT verschlechterten sich danach. Ur-



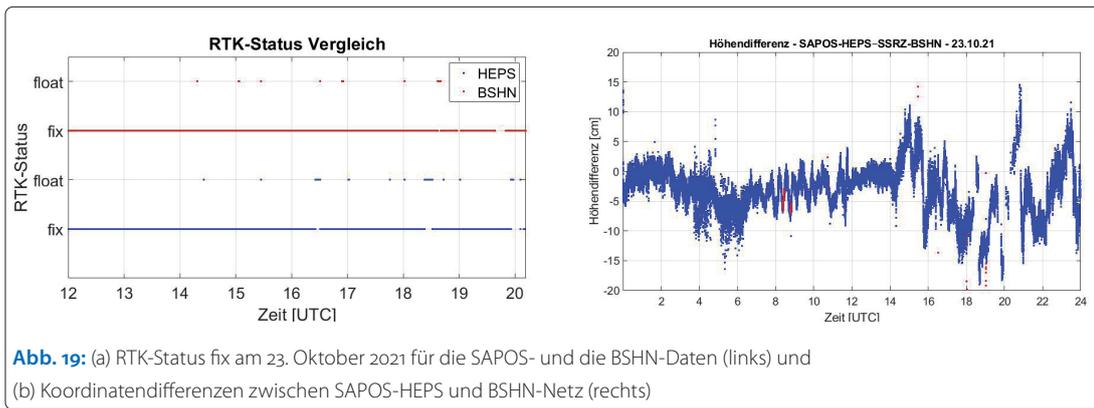


Abb. 19: (a) RTK-Status fix am 23. Oktober 2021 für die SAPOS- und die BSHN-Daten (links) und (b) Koordinatendifferenzen zwischen SAPOS-HEPS und BSHN-Netz (rechts)

sache waren kontinuierliche Ausfälle in den Daten der weit entfernten Referenzstationen in England und Norwegen (ab etwa 15 Uhr UT, Abb. 19b), die in der Netzlösung zu einer kontinuierlichen Abnahme gefixter Mehrdeutigkeiten führten. Damit variierte auch die Anzahl an SSR-Korrekturparametern, die für die Lösung der GNSS-Antenne auf den VWFS WEGA verwendet wurden. Die Stabilität der Netzseite war während des gesamten Messtages mit fast 100 % (vgl. Fixing-Rate in Abb. 19a) sehr hoch. Dieses gilt sowohl für das BSHN- als auch für das HEPS-Netz.

## 9 Ausblick

In diesem zweijährigen Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde das Potenzial der neuen innovativen Technologie (SSR-RTK) zur hochgenauen und zuverlässigen Positionierung in der AWZ nachgewiesen. Zum Betrieb eines zukünftigen echtzeitfähigen Korrekturdatendienstes sind wei-

terführende Arbeiten erforderlich. Aufgrund der heterogenen Netzstruktur sind die Verfügbarkeit, Datenqualität und Anzahl der Referenzstationen zu erhöhen, um die Ausfallsicherheit der Datenströme in die Berechnungen der Fehlermodelle zu optimieren. Systematische Einflüsse aus atmosphärischen Störungen der Ionosphäre und Troposphäre sollten aufgrund der hohen Dynamik der Modellparameter für das Zielgebiet genauer analysiert werden, um die Modellberechnungen für die großen Stationsentfernungen zu verbessern. Für eine Stützung der SSR-Modellberechnungen und Generierung von SSR-Korrekturdaten könnten weitere Stationen auf Plattformen in der Nordsee von Vorteil sein. Technische und qualitätssichernde Maßnahmen sind für einen dauerhaften Wirkbetrieb unerlässlich. Eine robuste Kommunikation zur Übertragung der SSR-Korrekturen ist wesentlich, eine dauerhaft betriebene Monitoringstation zur Überwachung des Betriebszustands unerlässlich. //

## Danksagung

Dieses F&E-Projekt verwendet Daten der Stationen ESBC, FER5, HIRS, SKEJ von »The Danish Agency for Data Supply and Efficiency« und EPN-Stationen (Bruyninx et al. 2019).

## Literatur

- AdV (2022): SAPOS – Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung. <https://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Integrierter-geodaetischer-Raumbezug/SAPOS/>
- Bauer, Manfred (2018): Vermessung und Ortung mit Satelliten. 7. Aufl., Wichmann
- Bruyninx, Carine; Juliette Legrand; András Fabian; Eric Pottiaux (2019): GNSS metadata and data validation in the EUREF Permanent Network. GPS Solutions, DOI: 10.1007/s10291-019-0880-9
- CODE (2022): Center for Orbit Determination in Europe – Astronomisches Institut. [www.aiub.unibe.ch](http://www.aiub.unibe.ch)
- Ellmer, Wilfried (2013): RTK in Referenznetzen auf See – Fokus Kommunikation. In: DVW (Hrsg.): GNSS 2013 – Schneller. Genauer. Effizienter. DVW-Schriftenreihe, Band 70, S. 181–188
- Fugro (2022): [www.fugro.com](http://www.fugro.com)
- Geo++ (2020a): Geo++ State Space Representation Format (SSRZ). Version 1.0, 21. September 2020, Geo++ GmbH, Garbsen. [www.geopp.de/ssrz](http://www.geopp.de/ssrz)
- Geo++ (2020b): GNSMART Software Modules. [www.geopp.de/gnsmart](http://www.geopp.de/gnsmart)
- Hirokawa, Rui; Ignacio Fernández-Hernández; Simon Reynolds (2021): PPP/PPP-RTK open formats: Overview, comparison, and proposal for an interoperable message. NAVIGATION, DOI: 10.1002/navi.452
- Jahn, Cord-Hinrich; Robert Schumann; Bernd Vahrenkamp et al. (2021): SSR-RTK – Korrekturdatendienst für hochgenaue Positionierung in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone in der Nordsee: Nordsee-Vernetzung. zfv, DOI: 10.12902/zfv-0342-2021
- SPARTN (2022): Secure Position Augmentation for Real Time Navigation. [www.spartnformat.org](http://www.spartnformat.org)
- Wübbena, Gerd; Martin Schmitz; Andreas Bagge (2005): PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks. 18th International Technical Meeting, ION GNSS-05, September 13-16, 2005, Long Beach, California. [www.geopp.com/pdf/ion2005\\_fw.pdf](http://www.geopp.com/pdf/ion2005_fw.pdf)
- Wübbena, Gerd; Jannes Wübbena; Temmo Wübbena; Martin Schmitz (2021): SSR und zukünftige GNSS-Anwendungen. Präsentation BfG-Kolloquium »Big, Smart, Geo Data – Veränderungen in der Geodäsie zum Nutzen der Wasserstraßen«, 23.-24.11.2021