

# HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

Journal of Applied Hydrography

06/2023

HN 125

3D-Positionierung  
auf See

60km





OceanPack™  
Underway

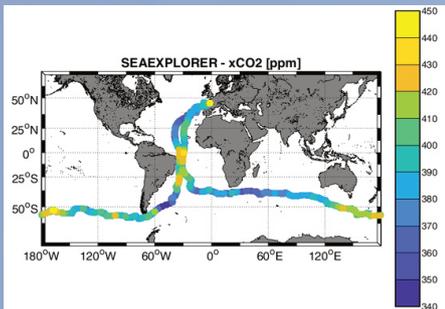


RACE



pCO<sub>2</sub> / Greenhouse Gas  
Analyzer

pCO<sub>2</sub> data



Round the World



©Boris  
Herrmann  
Racing



Sampler for  
Microplastic &  
Plankton

## Monitoring for GHG, pCO<sub>2</sub>, Analyzer & Sampler

Modular, easy to use and reliable monitoring systems.

Water quality monitoring for: profiling, underway  
and mooring

# Liebe Leserinnen und Leser,

diese *HN*-Ausgabe ist in mehrere Teile unterteilt. Auf den ersten Seiten lesen Sie die Beiträge zum *DHyG Student Excellence Award*. Die Abschlussarbeiten von zwei Studentinnen wurden in diesem Jahr nominiert. Ausgezeichnet wird die Masterarbeit von Manuela Ammann von der Fachhochschule Nordwestschweiz in Muttenz. Sie hat sich mit der robotergestützten photogrammetrischen Unter-Wasser-Inspektion von Wasserkraftwerken beschäftigt (Seite 6). Mit dem denkbar knappsten Abstand landete Ellen Werner auf Platz zwei. Die Absolventin von der Hafencity Universität Hamburg hat untersucht, ob Echolote geeignet sind, um die variable Dicke des Meereises zu bestimmen (Seite 12).

Die nächsten Fachbeiträge sind dem Schwerpunktthema dieser Ausgabe gewidmet, sie befassen sich mit der »3D-Positionierung auf See«. Als wir das Thema gesetzt haben, waren wir gespannt, welche Beiträge eingereicht werden. Wir waren uns der mehrfachen Bedeutung des Ausdrucks »Positionierung« bewusst. Es könnte um die Positionsbestimmung des Messsensors gehen, um die Platzierung eines Objekts unter Wasser oder auch um das Einnehmen einer Position bei einer Navigationsaufgabe. Zu allen Bereichen haben wir von den Autoren (tatsächlich ausschließlich Männer) Fachbeiträge erhalten.

Gleich vier Fachbeiträge befassen sich mit der Nutzung von GNSS (ab Seite 17). Und auch im Wis-

senschaftsgespräch mit Professor Lambert Wanninger geht es um die Nutzung von GNSS für die Gewässervermessung (Seite 48). Zu den Möglichkeiten von PPP-RTK auf dem Meer gibt es in den Beiträgen durchaus unterschiedliche Einschätzungen.

Die weiteren Artikel befassen sich dann mit der Positionierung unter Wasser: mit der Navigation eines AUV zum Monitoring von Pipelines (Seite 54), mit der Positionierung von AUVs unter einer Eisdicke (Seite 60) und mit der Positionierung unter Wasser mit Hilfe von Kameras (Seite 66).

Die Autoren des letzten Beitrags im Heft plädieren für den Einsatz von autonomen Systemen zur automatisierten Vermessung (Seite 71).

Diese Ausgabe erscheint rechtzeitig zum Hydrographentag, der am 20. und 21. Juni in Berlin stattfindet. Der Zufall will es, dass am 21. Juni auch *World Hydrography Day* ist. In diesem Jahr wird an diesem Tag auf das Thema »Digitale Zwillinge des Ozeans« aufmerksam gemacht. Mit einem ganz ähnlichen Thema – »BIM und Digitale Zwillinge« – werden wir uns in der Oktober-Ausgabe der *HN* auseinandersetzen. Vielleicht haben Sie einen passenden Beitrag.

In Berlin beim Hydrographentag haben Sie übrigens Gelegenheit, die beiden Kandidatinnen für den *DHyG Student Excellence Award* live zu erleben, wenn sie ihre Forschungsbeiträge vorstellen. Das soll Sie aber nicht davon abhalten, jetzt gleich mit dem Lesen zu beginnen ...



Lars Schiller

---

## Hydrographische Nachrichten HN 125 – Juni 2023

### Journal of Applied Hydrography

Offizielles Organ der Deutschen Hydrographischen  
Gesellschaft – DHyG

#### Herausgeber:

Deutsche Hydrographische Gesellschaft e. V.  
c/o Innomar Technologie GmbH  
Schutower Ringstraße 4  
18069 Rostock

ISSN: 1866-9204

© 2023

#### Chefredakteur:

Lars Schiller  
E-Mail: lars.schiller@dhyg.de

#### Redaktion:

Peter Dugge, Dipl.-Ing.  
Horst Hecht, Dipl.-Met.  
Holger Klindt, Dipl.-Phys.  
Friederike Köpke, M.Sc.  
Dr. Jens Schneider von Deimling  
Stefan Steinmetz, Dipl.-Ing.  
Ellen Werner, M.Sc.  
Dr. Patrick Westfeld

#### Hinweise für Autoren und Inserenten:

www.dhyg.de > Hydrographische Nachrichten >  
Mediadaten und Hinweise

Accurate INX navigation

10 min deployment

High payload capacity



High speed and manoeuvrability

Robust biomimetic design

## ■ YUCO – THE MICRO AUV

Yuco is the perfect micro AUV for all types of coastal waters. It unites a practice design, high reliability, precise navigation and lean deployment.

Your new way to use AUV's.



Photo: Christian Palmer

### ■ CHARACTERISTICS

- » Length 98 cm
- » Diameter 12 cm
- » Weight in the air 8 kg
- » Depth rating 300 m
- » Speed 2 to 6 knots
- » Endurance 10 hours at 2.5 knots

### ■ FURTHER INFORMATIONS



# 3D-Positionierung auf See

## DHyG Student Excellence Award I

- 6 **Robotic photogrammetric underwater inspection of hydropower plants**  
An article by MANUELA AMMANN

## DHyG Student Excellence Award II

- 12 **Measuring sea ice thickness**  
Exploring the feasibility of echo sounders for close-range determination of sea ice draft  
An article by ELLEN WERNER

## GNSS I

- 17 **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

## GNSS II

- 28 **Vergleich von Positionierungsdiensten im Offshore-Bereich**  
Ein Beitrag von SEBASTIAN KNAPPE, GUNTER LIEBSCH, LUDWIG SCHRÖDER, TOBIAS PETER BAUER, AXEL RÜLKE, PETER NEUMAIER und PATRICK WESTFELD

## GNSS III

- 38 **Fugro Marinestar Precise Point Positioning status update**  
An article by HANS VISSER

## GNSS IV

- 44 **GNSS für die 3D-Positionierung auf See**  
Ein Beitrag von FRANK HINSCHKE

## Wissenschaftsgespräch

- 48 **»Konvergenzzeiten treten idealerweise nur bei der Fahrt ins Einsatzgebiet auf«**  
Ein Interview mit LAMBERT WANNINGER

## AUV-Navigation

- 54 **Autonome Unter-Wasser-Fahrzeuge für das hydrographische Monitoring von kritischen Infrastrukturen**  
Ein Beitrag von NIKLAS-MAXIMILIAN SCHILD, LUKAS KLATT, MARKUS KRAFT und HARALD STERNBERG

## Under-ice positioning

- 60 **Positioning robotic systems under ice**  
A summary of challenges and potential ways forward  
An article by CHRISTIAN KATLEIN

## Subsea camera-based survey

- 66 **Subsea positioning using camera systems**  
An article by MERLIJN VAN DEEN

## Automation and autonomy

- 71 **Autonomy enables German survey companies to leverage opportunities from offshore wind**  
An article by SÖREN THEMANN and DANIEL ESSER

# Robotic photogrammetric underwater inspection of hydropower plants

An article by MANUELA AMMANN

Hydropower is the most important domestic source of renewable energy in Switzerland, accounting for around 57 % of domestic electricity production. The high intensity usage of hydropower plants results in high costs for regular maintenance and inspection, which are currently carried out through manual inspections by professional divers. The aim of this work was to develop a workflow for underwater photogrammetry with remotely operated vehicles (ROV) to supplement or replace these dangerous and expensive dives. A calibration frame was developed to provide a scale reference for the data collected during the inspection. With different acquisition missions, investigations on camera calibration and 3D reconstruction were performed. The reconstruction of underwater objects was successfully implemented. Well-distributed control points provide accurate results as a point cloud with a sub-centimetre accuracy at object distances of up to 6 metres. 80 % of the point cloud differ less than 1 centimetre from the reference scan.

underwater photogrammetry | 3D reconstruction | structure from motion | camera calibration | ROV  
Unter-Wasser-Photogrammetrie | 3D-Rekonstruktion | Structure-from-motion | Kamerakalibrierung | ROV

Wasserkraft ist mit einem Anteil von rund 57 % an der Stromproduktion die wichtigste inländische Quelle für erneuerbare Energien in der Schweiz. Die hohe Nutzungsintensität von Wasserkraftwerken führt zu hohen Kosten für die regelmäßige Wartung und Inspektion, die derzeit durch manuelle Inspektionen von professionellen Tauchern durchgeführt werden. Ziel dieser Arbeit war es, einen Arbeitsablauf für die Unter-Wasser-Photogrammetrie mit ferngesteuerten Fahrzeugen (ROV) zu entwickeln, um die gefährlichen und teuren Tauchgänge zu ergänzen oder zu ersetzen. Es wurde ein Kalibrierungsrahmen entwickelt, um einen Maßstabsbezug für die während der Inspektion erfassten Daten zu schaffen. Mit verschiedenen Erfassungsmissionen wurden Untersuchungen zur Kamerakalibrierung und 3D-Rekonstruktion durchgeführt. Die Rekonstruktion von Unter-Wasser-Objekten wurde erfolgreich umgesetzt. Gut verteilte Passpunkte liefern genaue Ergebnisse als Punktwolke mit einer Sub-Zentimeter-Genauigkeit bei Objektabständen von bis zu 6 Metern. 80 % der Punktwolke weichen weniger als 1 Zentimeter vom Referenzscan ab.

## Author

Manuela Ammann is research assistant at FHNW Universities of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland in Muttenz.

[manuela.ammann@fhnw.ch](mailto:manuela.ammann@fhnw.ch)

## 1 Introduction

Due to the topography and considerable average rainfall, Switzerland offers ideal conditions for the use of hydroelectric power. With around 57 % of domestic electricity production, hydropower is our most important domestic source of renewable energy (BFE 2022). A major challenge associated with hydropower generation and storage is the high intensity of the plants, resulting in high costs for regular maintenance and inspection of these plants. Current underwater inspections of hydropower plants in rivers can be dangerous and expensive, as manual inspections by professional divers are necessary. The aim of this project in cooperation with Axpo Power AG and Schuck Consulting was the development and verification of a novel workflow for 3D mapping based on an ROV-based underwater structure-from-motion process.

## 2 Related work

3D reconstruction is used in various fields. The image-based reconstruction of in air objects is already well researched. Various applications exist, where 3D underwater reconstruction is used, for example monitoring marine ecosystems (Neyer, Nocerino and Gruen 2018), mapping archaeological heritage (Bruno et al. 2015) and underwater construction (Chemisky et al. 2021), etc.

Underwater reconstruction applications with optical systems require images from a short distance, whereby a large number of images is needed to create complete 3D scenes (Chemisky et al. 2021). For true-to-scale 3D reconstructions, a scaling factor is applied leveraging control points with local or global coordinates, scale bars or stereo camera configurations. The accuracy of the 3D model mainly depends on the quality of the images (contrast, sharpness, exposure), the environ-

mental conditions (visibility, particles in the field of view) and the scene (heterogeneity of texture, moving objects). Furthermore, parameters such as the scaling method or the camera calibration influence the accuracy of the reconstruction (Chemisky et al. 2021).

Comprehensive calibration is essential, when accuracy is important and especially when the measured object has a 3D surface (Shortis 2019). There are different approaches to calibrate the camera, e.g. using a scale bar (Aragón et al. 2018), reference tape measurements (McCarthy and Benjamin 2014), a target board or plane (Menna, Nocerino and Remondino 2017) or a geodetic network (Neyer, Nocerino and Gruen 2018).

### 3 Materials and methods

#### 3.1 Materials

For this project a Sony Alpha 7 II (ILCE-7M2) (Sony Europe B.V. 2022) with a lens FE 28 mm F2 (SEL28F20) with a 75° FOV is used. The camera is placed in a Sony A7 II NG V.2 Series UW underwater camera housing kit with an 8" dome port from seafrog (seafrogs 2023). The housing is mounted underneath a BlueROV2 (Fig. 1), which is an underwater robot with open-source electronics and software (Blue Robotics Inc 2022). Because the camera housing is larger than what the payload kit allows, the height was extended by 3D printed plates (Fig. 1, right). The ROV is manually steered on an external computer via the ROV camera stream.

#### 3.2 Calibration frame

A calibration frame made of aluminium (Fig. 2) was developed to perform a self-calibration during the 3D reconstruction. The objects of interest are captured by moving the ROV on an arc on different heights, due to the fixed mounting of the camera, which allows horizontal image capturing only.



Fig. 1: ROV (left) and ROV with extended payload-kit and the camera (right)

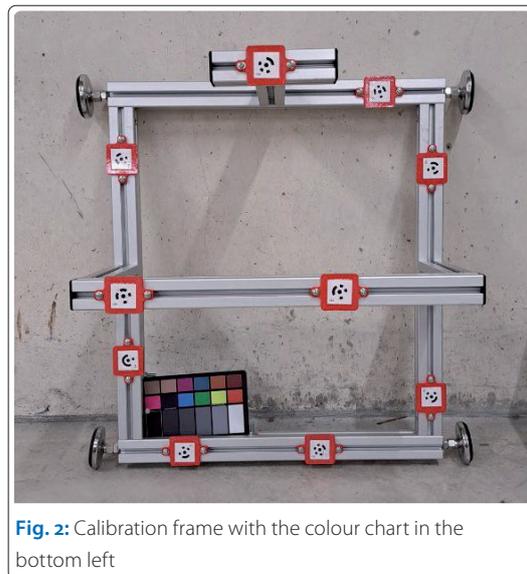


Fig. 2: Calibration frame with the colour chart in the bottom left

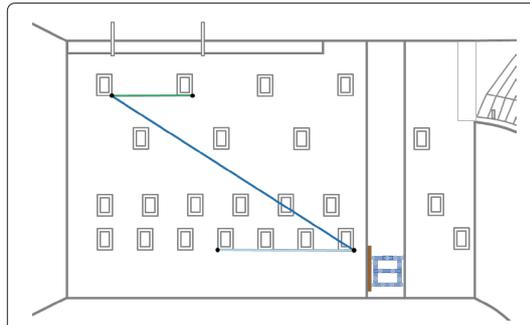
Multiple exposures should ensure the redundancy of the images.

#### 3.3 Study areas and data acquisition

To capture test data three different study areas were evaluated. The indoor swimming pool in MuttENZ was used for test capturing in clear water. Furthermore, the water lock (Fig. 3 and Fig. 4) was



Fig. 3: The hydropower plant in Eglisau: The water lock (orange) and the water filter (blue) in the inlet basin



**Fig. 4:** Sketch of the water lock wall, the mounted calibration frame (blue object) and the measured lines for comparison: line 1 (green), line 2 (dark blue) and line 3 (light blue)

used for the capturing with a reference measurement, which were performed with the laser scanner. By filling the lock, different water levels can be set, simulating different depths (1 to 10 m) of acquisition. And finally, a water filter in the water (Fig. 3) was used to have a real object.

The focus of the camera could not be set manually due to the camera trigger software available with the test system. A summary of the image acquisition at the hydropower station in Eglisau can be found in Table 1.

For reference measurements, a Leica RTC360 laser scanner was used to create a dense and very accurate scan of the empty water lock with a 3D point accuracy of approximately 2.8 mm at 20 m and a Leica TS60 total station was used to determine control points for referencing in a local coordinate system with a 3D point accuracy of approximately 2.25 mm at 20 m.

**3.4 Camera calibration**

The camera was calibrated in Agisoft Metashape (Agisoft LLC 2022) conducting a self-calibration. The standard frame camera model of Metashape with Brown Distortion Model was used (Brown 1971).

The parameters focal length ( $f$ ), principal point offset ( $x_0$  and  $y_0$ ), the radial distortion coefficients ( $K_1$  to  $K_4$ ), the tangential distortion coefficients ( $P_1$  and  $P_2$ ) and the affinity and non-orthogonality coefficients ( $B_1$  and  $B_2$ ) were determined. Different parameter sets were examined by three methods (Table 2) with original or pre-processed white balanced images. The values are statistically tested using the Student T distribution as in Harvey and Shortis (1998).

**3.5 3D reconstruction**

For 3D reconstruction, a dense point cloud was computed in Metashape with the self-calibrated cameras. The resulting point cloud of the water lock was compared to the reference scan using the plugin M3C2 in CloudCompare (2023). Furthermore, the scale was controlled by three reference lines (Fig. 4) in the water lock.

For the point cloud of the water filter no reference data was available. To assess the quality of this mission, a cylinder is fitted into the data using the tool Best Cylinder in Cyclone 3DR (Leica Geosystems 2023) from Leica and the diameter is compared with the nominal value of the manufacturer (32.39 cm).

**4 Results**

**4.1 Camera calibration**

All missions and methods varied significantly, hence, a mission with calibration method 1 was divided into three parts of 20 images each. For these parts the calibration was recalculated. Fig. 5 shows that even in one mission the camera results in significantly different parameters.

**4.2 3D reconstruction**

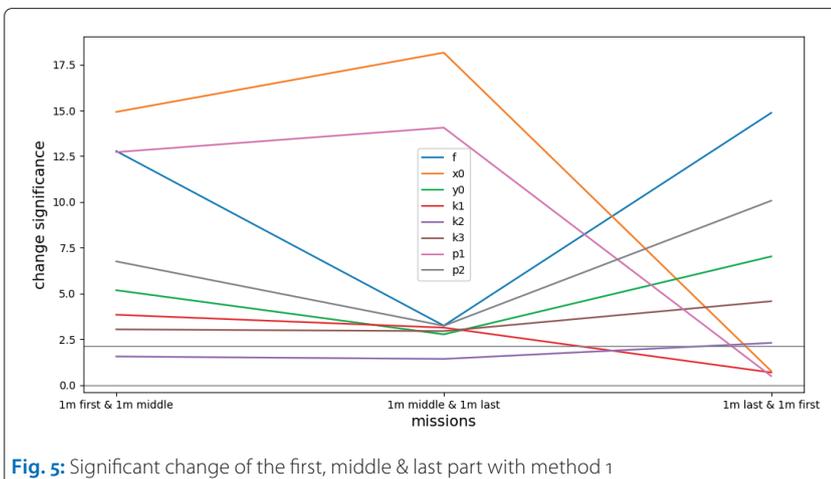
The processed point clouds of the water lock were compared to the reference scan for each calibration method. Fig. 6 shows a close-up of the histograms of the deviation between 3D reconstruction and reference scan. 80 % of the points in the point cloud of method 1, 78 % of method 2 and 80 % of method 3 differ less than 1 cm.

Date	Environment	Places	Images	Distance	Depth
19.12.2022	In air	Indoor swimming pool	57	1.5 to 2 m	-
19.12.2022	In pool	Indoor swimming pool	202	2 m	2 m
30.11.2022	In river	Water lock	271	0.1 to 2 m	1, 3, 5, 7 and 10 m
20.01.2023	In river	Water lock	1594	0.1 to 2 m	0.5 to 10 m
20.01.2023	In river	Water lock	359	0.1 to 2 m	0.5 to 5 m

**Table 1:** Summary of the image based acquisition

Method	White balanced images	$f$	$x_0$	$y_0$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$P_1$	$P_2$	$B_1$	$B_2$
1	-	x	x	x	x	x	x	-	x	x	-	-
2	x	x	x	x	x	x	x	-	x	x	-	-
3	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

**Table 2:** Overview calibration methods



**Fig. 5:** Significant change of the first, middle & last part with method 1

The reference lines show similar results (Table 3). The largest differences occur at the shortest reference distance, which is slightly extrapolating and has less image overlap. One mission (based frame at last column) shows greater differences with an average of 3.6 cm. The mission is orientated based on the calibration frame only and thus the lines were extrapolated.

The reconstruction of the water filter (Fig. 7) is referenced based on the calibration frame and results in a very dense point cloud (point distance up to 0.3 mm). However, the reconstructed point cloud has missing parts.

The *Best Cylinder* tool was applied to the points of the pipe and results in a cylinder with a diameter of 33.12 cm (Fig. 8). Therefore, a difference of 0.73 cm to the nominal diameter resulted.

### 5 Discussion

The camera calibrations of the different missions, as well as the different calibration methods, show a significant variability (Fig. 5). Possible explanations are the instable mounting in the water housing and the autofocus.

However, as discussed by Luhmann (2018), if the 3D measurements in object space later turns out sufficiently accurate, the corresponding camera calibration is also sufficient. Hence, the processing of the 3D reconstruction can successfully be carried out and investigated.

For each method, a point cloud was reconstructed. There are no major differences between the calibration methods (Fig. 6). Only the point clouds from method 2 are slightly more widely distributed than those from the other methods. The white balanced images do not improve the results of these missions. Since method 3 uses more parameters, there are more uncertainties possible. Therefore, it is recommended to use method 1.

The largest deviations of the distances were found in the extrapolated areas of the water lock, while areas within the control points showed only a deviation of 1 cm. The results from the mission, which orientation is based on the calibration frame, revealed even larger deviations.

The water filter could be reconstructed as a 3D point cloud (Fig. 7). There are certain holes in the point cloud which are probably from a small image overlap, the fixed acquisition angle of the

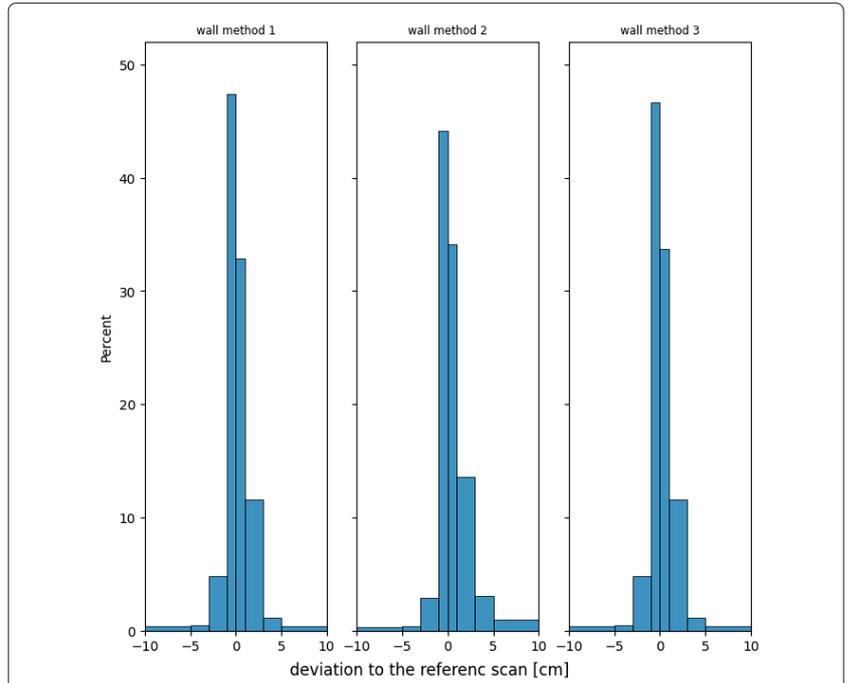


Fig. 6: Deviation per calibration method of the point cloud to the reference scan (close up)

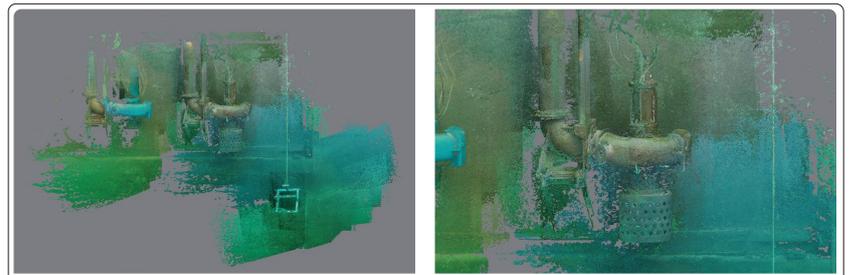


Fig. 7: Point cloud of the water filter (left) and a close up (right)

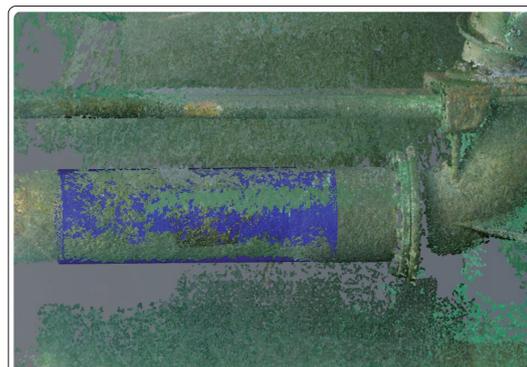


Fig. 8: Calculated cylinder for the pipe in the point cloud of the water filter (figure rotated by 90°)

	Reference scan	TS60 points	Photogrammetric reconstruction						Reconstruction – based frame	
			Method 1	Method 2	Method 3	Δ method 1	Δ method 2	Δ method 3	Method 1	Δ method 1
Line 1	3.722	3.725	3.709 m	3.713 m	3.708 m	1.6 cm	1.2 cm	1.7 cm	3.684 m	4.1 cm
Line 2	5.835	–	5.838 m	5.835 m	5.836 m	0.3 cm	0.0 cm	0.1 cm	5.825 m	1.0 cm
Line 3	12.764	12.764	12.766 m	12.768 m	12.766 m	0.2 cm	0.4 cm	0.2 cm	12.706 m	5.8 cm
						∅ 0.7 cm	∅ 0.6 cm	∅ 0.7 cm		∅ 3.6 cm

Table 3: Comparison of line measurements in the point cloud and the reference scan

camera or the difficulties with the access of the object. The tool *Best Cylinder* fits a cylinder in the point cloud. Despite the large extrapolation, as is referenced based on the calibration frame, the difference is 0.73 cm to the nominal diameter (Fig. 8).

## 6 Conclusion and outlook

The photogrammetric reconstruction of underwater objects was successfully implemented with the current set-up. Thanks to the calibration frame and additional control points, true-to-scale and very dense point clouds can be reconstructed, which can be used for further purposes. With well distributed control points, accuracies of sub-centimetres at distances of up to 6 m and 80 % of the points within a deviation of  $\pm 1$  cm can be achieved.

While survey areas framed by control points showed less deviation than 1 cm, the largest deviations of the distances were found in the extrapolat-

ed areas of the water lock. More calibration frames or scale positioning in the area could potentially reduce the distortion over larger distances. Future research should be in this field.

The calibration results of the different missions and methods show a significant variability. Further investigations with improved camera mounting and better camera control are needed to determine the cause of these variations. A good camera calibration could improve the accuracy of extrapolation.

The water filter was successfully reconstructed as a 3D point cloud, however, there are some limitations with this set-up as the point cloud has holes. This can be attributed to low image overlap, the fixed acquisition angle of the camera or the lack of access. The tool *Best Cylinder* could successfully fit a cylinder into the point cloud, despite the large extrapolation. //

---

## References

- Agisoft LLC (2022): Agisoft Metashape. [www.agisoft.com/](http://www.agisoft.com/) (accessed 10 October 2022)
- Aragón, Enrique; Sebastia Munar; Javier Rodríguez; Kotaro Yamafune (2018): Underwater photogrammetric monitoring techniques for mid-depth shipwrecks. *Journal of Cultural Heritage*, DOI: 10.1016/j.culher.2017.12.007
- BFE (2022): Wasserkraft. Bundesamt für Energie; [www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/erneuerbare-energien/wasserkraft.html](http://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/erneuerbare-energien/wasserkraft.html) (accessed 3 October 2022)
- Blue Robotics Inc (2022): BlueROV2. Blue Robotics; <https://bluerobotics.com/store/rov/bluerov2/> (accessed 26 September 2022)
- Brown, Duane C. (1971): Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, No. 37, pp. 855–866
- Bruno, Fabio; Antonio Lagudi; Alessandro Gallo; Maurizio Muzzupappa; Barbara Davidde Petriaggi; Salvatore Passaro (2015): 3D Documentation of Archaeological Remains in the Underwater Park of Baiae. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W5-41-2015
- Chemisky, Bertrand; Fabio Menna; Erica Nocerino; Pierre Drap (2021): Underwater Survey for Oil and Gas Industry: A Review of Close Range Optical Methods. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs13142789
- CloudCompare (2023): CloudCompare – Open Source project. [www.cloudcompare.org](http://www.cloudcompare.org) (accessed 1 February 2023)
- Harvey, Euan Sinclair; Mark R. Shortis (1998): Calibration stability of an underwater stereo-video system: implications for measurement accuracy and precision. *Marine Technology Society Journal*, No. 32, pp. 3–17
- Leica Geosystems (2023): Leica Cyclone 3DR. <https://leica-geosystems.com/de-CH/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-3dr> (accessed 1 February 2023)
- Luhmann, Thomas (2018): *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen – Methoden – Beispiele*. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Wichmann-Verlag
- McCarthy, John; Jonathan Benjamin (2014): Multi-image Photogrammetry for Underwater Archaeological Site Recording: An Accessible, Diver-Based Approach. *Journal of Maritime Archaeology*, DOI: 10.1007/s11457-014-9127-7
- Menna, Fabio; Erica Nocerino; Fabio Remondino (2017): Flat Versus Hemispherical Dome Ports in Underwater Photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-481-2017
- Neyer, Fabian; Erica Nocerino; Armin Gruen (2018): Monitoring Coral Growth – Comparing Underwater Photogrammetry and Geodetic Control Network. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-759-2018
- seafrogs (2023): Sony A7 II NG V.2 Series UW camera housing kit with 8" Dome port. seafrogs, <https://seafrogs.com/hk/> (accessed 17 January 2023)
- Shortis, Mark (2019): Camera Calibration Techniques for Accurate Measurement Underwater. In: *3D Recording and Interpretation for Maritime Archaeology*. Coastal Research Library, Springer International Publishing, DOI: 10.1007/978-3-030-03635-5\_2
- Sony Europe B.V. (2022): Sony Alpha 7 II. Sony, [www.sony.ch/de/electronics/wechselobjektivkameras/ilce-7m2-body-kit](http://www.sony.ch/de/electronics/wechselobjektivkameras/ilce-7m2-body-kit) (accessed 17 January 2023)



KONGSBERG

# Underwater ACOUSTICS

MULTIBEAM ECHOSOUNDERS

## THE COMPLETE MULTIBEAM ECHOSOUNDER PRODUCT RANGE

We are a leading manufacturer of multibeam echo sounder systems for seabed mapping. Our product range includes models for all water depths and virtually any application.

[kongsberg.com/maritime](http://kongsberg.com/maritime)

# Measuring sea ice thickness

## Exploring the feasibility of echo sounders for close-range determination of sea ice draft

An article by ELLEN WERNER

This work explores the potential of using commercial single-beam echo sounders for accurate thickness determination of sea ice. Therefore, an own sensor system has been developed which allows to study the performance of different echo sounders monitoring sea ice under varying environmental conditions in a laboratory setup. The sensor system consists of three single-beam echo sounders operating at different frequencies (115 kHz, 200 kHz, 500 kHz), a CTD probe measuring physical water properties and instruments frozen in the ice measuring temperature and salinity. Different experiments were conducted observing the sea ice state while performing acoustic range determinations. Subsequent, statistical measures were calculated to evaluate the accuracy of inferred sea ice draft. The study concludes that a draft accuracy of  $\pm 0.5$  cm is reached by the implemented method under specific conditions and that the acoustic approach for determining sea ice draft thickness is applicable using frequencies of 115 kHz or 200 kHz.

sea ice draft | SBES | ULS – upward looking sonar | acoustic properties | accuracy evaluation  
Meereistiefe | SBES | ULS – upward looking sonar | akustische Eigenschaften | Genauigkeitsabschätzung

In dieser Arbeit wird das Potenzial des Einsatzes kommerzieller Einstrahlecholote zur genauen Bestimmung der Meereisdicke untersucht. Dazu wurde ein eigenes Sensorsystem entwickelt, mit dem die Performance verschiedener Echolote zur Überwachung des Meereises unter verschiedenen Umweltbedingungen in einem Laboraufbau analysiert werden kann. Das Sensorsystem besteht aus drei Einstrahlecholoten, die mit unterschiedlichen Frequenzen arbeiten (115 kHz, 200 kHz, 500 kHz), einer CTD-Sonde zur Messung der physikalischen Wassereigenschaften und mehreren im Eis eingefrorenen Instrumenten zur Messung von Temperatur und Salzgehalt. Es wurden unterschiedlich angelegte Experimente durchgeführt, bei welchen der Meereiszustand beobachtet und gleichzeitig akustische Entfernungsbestimmungen vorgenommen wurden. Anschließend wurden statistische Maße berechnet, um die Genauigkeit der abgeleiteten Meereistiefe zu bewerten. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass mit der implementierten Methode unter bestimmten Bedingungen eine Tiefgangsgenauigkeit von  $\pm 0,5$  cm erreicht wird und dass der akustische Ansatz zur Bestimmung der Meereis-Tiefgangsdicke bei Frequenzen von 115 kHz oder 200 kHz anwendbar ist.

### Author

Ellen Werner wrote her Master Thesis in cooperation with the Sea Ice Research Group at the Institute of Oceanography, Universität Hamburg. Meanwhile she works as research assistant at HafenCity University Hamburg.

[ellen.werner@hcu-hamburg.de](mailto:ellen.werner@hcu-hamburg.de)

### Motivation

Sea ice plays an important role in today's climate studies. The sea ice covering the polar oceans is a critical component of the global climate system serving as a climate change indicator as well as an amplifier of the same (Golden et al. 2020). Accurate measurement of sea ice thickness is thus critical to better understand, model and predict climate change. However, determining the sea ice thickness remains challenging as no fully adequate method to measure ice thickness distribution and its variability with appropriate resolution in space and time exists (Wadhams and Amanatidis 2006). Several techniques in use involve either in-situ measurements by drilling a hole through the ice or by deploying instruments in or on the ice.

Other currently used methods are calculating the ice thickness from indirect measurements. Direct remote monitoring of sea ice change, however, is difficult and under scientific investigation. Using acoustic sensors may provide a possible approach to measure the total sea ice thickness (Bassett et al. 2020).

So far, there have been numerous attempts and techniques with acoustic sensors in use, e.g. mounted at stationary buoys and moorings or moving underwater platforms. However, there have been only sparse investigations on accuracy measures of using present days sonar technologies. Although sea ice thickness is next to its extent a fundamental state parameter for sea ice-related studies and also crucial for almost all sea ice-relat-

ed investigations performed in a laboratory, there have only been few attempts in remotely monitoring sea ice change in a close-range environment. This is where the studies presented in this article want to step in.

The underlying Master Thesis analyses and discusses the use of commercial echo sounders, mounted as upward looking sonars (ULS), in a combined sensor setup for determining the thickness of laboratory-grown sea ice and provides corresponding error assessment. Within that scope, three main research questions are experimentally investigated: Which acoustic frequency is optimal for a given application? How accurate is sea ice draft determination from echo sounders compared to conventional techniques? Which impact has the sea ice condition (varying temperature and salinity) on acoustic range measurements?

## Background

Sea ice forms from ocean water, and hence the presence of salt dictates its physical processes. This makes sea ice a morphological complex media changing its physical properties and structure during ice growth and decay. Temperature and salinity of sea ice are the prime controlling variables determining the sea ice state. Any temperature change directly affects the sea ice porosity and thus its acoustic reflectivity (Petrich and Eicken 2010). Direct measurement of both, temperature and salinity, are difficult and accurate in-situ measurements require the inserting of corresponding devices into the ice.

A good overview of ice internal structures and the complexity of sea ice in relation to acoustic properties is provided by Bassett et al. (2020). Of special interest for the presented study is the complex region at the transition zone from sea ice to sea water, which is commonly referred as skeletal layer. It displays a smooth transition from properties of sea water to the bulk properties of sea ice instead of a clearly determinable surface. Especially for acoustic wavelengths in the scale of the skeletal layer thickness, the sea ice underside, which forms a lamellar structure (as can be seen in Fig. 1), has to be determined as a rough surface. And at a rough surface in comparison to wavelength, the physical structure becomes controlling and acoustic scattering is less coherent (Bassett et al. 2016; Stanton et al. 1986).

Sea ice is less dense than the sea water it is floating on. The assumption that the ice sheet is in hydrostatic balance, leads to the determination of two layers with respect to the water level: ice freeboard  $h_{free}$  (height of the ice above the water-line) and the ice draft  $h_{draft}$  (height of the ice below the water-line). Adding both layers results in the total ice thickness  $h_{ice}$ .

The distance measured by the echo sounder



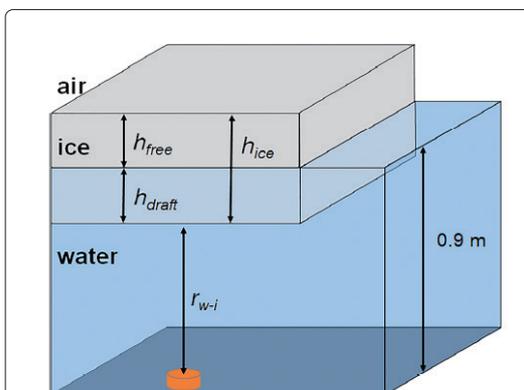
**Fig. 1:** The complex microstructure of the skeletal layer, its size and orientation can be seen by pouring colorant on the bottom of ice cores

is the range  $t_{w-i}$  from the transducer face to the water-ice interface. A schematic representation of sea ice vertical components and distances according to the laboratory conditions is shown in Fig. 2. As the ice draft constitutes about 90 % of the ice thickness, it represents a robust proxy for the total ice thickness while observing its change.

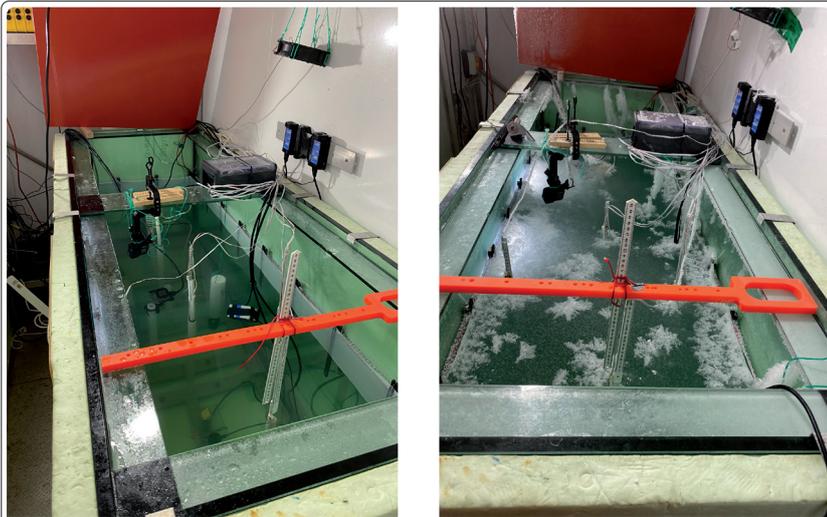
## Methods

The Max Planck Institute of Meteorology and the Sea Ice Research Group of the Institute for Oceanography, Universität Hamburg, operate a sea ice laboratory with water tanks in a freezing chamber where artificial sea ice can be grown. The air temperature in the freezing chamber can be set to temperatures down to  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The large water tank, which has been used for the main experiments, is 194 cm long, 66 cm wide and filled with water up to a height of  $\sim 90\text{ cm}$  at the beginning of experiments (cf. Fig. 3).

A new sensor setup is developed and data acquisition routines for all used instruments are programmed. The time triggered acquisition routine for the echo sounders is publicly avail-



**Fig. 2:** Schematic representation of sea ice vertical components showing the relations between the total ice thickness, freeboard and draft. The depth label is specific to the tank measurements of the experimental setup. Adopted from Bassett et al. (2020)



**Fig. 3:** Large tank in the freezing chamber insulated at bottom and sidewalls with 5 cm thick Styrofoam plates to ensure the water inside the tank is only cooled through the air-water interface as under natural conditions. (a) without sea ice (b) with sea ice

able on Github (<https://github.com/elwerner/SealceSonar>). Data acquisition and analysis is done using Python programmes. After initial testing, a successful barcheck has been conducted. Within four main experiments (each lasting around one week, including an initial freezing period, a melting period to warm the sea ice, another freezing period and a final ice decay period) acoustic range measurements of three echo sounders with different frequencies and resolutions have been recorded. In addition to the acoustic monitoring, physical parameters of the growing sea ice were observed to conclude on acoustic reflection behaviour. The experiments have been tailored with varying salinity of the initial tank water. Retrieved draft measurements of laboratory-grown sea ice

up to 18 cm thick were compared and validated with reference measurements using rulers frozen into the ice sheet. Subsequently, it was analysed whether the inferred sea ice draft can reach an accuracy better than  $\pm 0.5$  cm.

The instrumentation used for the experiments includes three commercial echo sounders with different technical specifications which are listed in Table 1. The three single-beam echo sounders (SBES) used in the constructed mounting in the large tank are displayed in Fig. 4.

Furthermore, the instrumentation consists of auxiliary sensors including two CTD probes for measuring water column properties (for sound speed correction of the SBES data), seven T-Sticks (temperature sensor arrays frozen vertically in the ice to retrieve temperature profiles), a salinity harp (a sensor based on conductivity measurements to retrieve bulk salinity and liquid fraction of sea ice to state the sea ice permeability) and two GoPro cameras (to visually observe the sea ice state from outside the freezing chamber).

The recorded acoustic range measurements are in a first calculation step sound speed corrected and subsequently the sea ice draft gets determined by subtracting the distance between sonar head and the ice underside from the distance to the water surface. Additionally, a rolling median filter over ten measurements per sonar is computed to low pass filter the data. To compare the draft measurements inferred from the echo sounder data to the reference drafts read from rulers, residuals are calculated.

### Experimental results

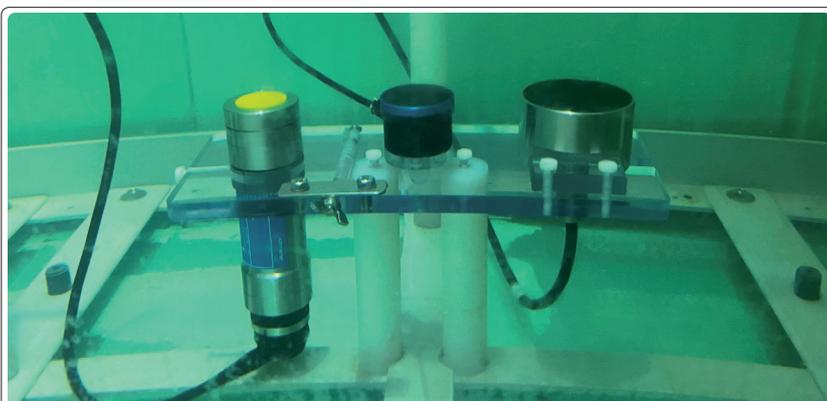
Implementation of the sensor system for echo sounder data acquisition in the sea ice laboratory is working as intended for acquiring temporal triggered echo sounder data. An impression of the resultant time series plot of the determined sea ice draft from all three echo sounders during the first experiment in the large tank is presented in Fig. 5.

Interpreting the visualised data, it can be summarised that the growth and decay of sea ice draft is detected by all three echo sounders over the full duration of the experiment. However, all sonars produce outliers and erroneous range recordings. The Tritech shows the least coherent but best trend approximating result. The Ping reveals major problems with its detection algorithm during the freezing periods detecting ranges far beyond the ice surfaces. The Airmar shows the most stable time series with outliers to the short range side, however, the instrumental vertical resolution results in a limited draft resolution showing a step wise behaviour.

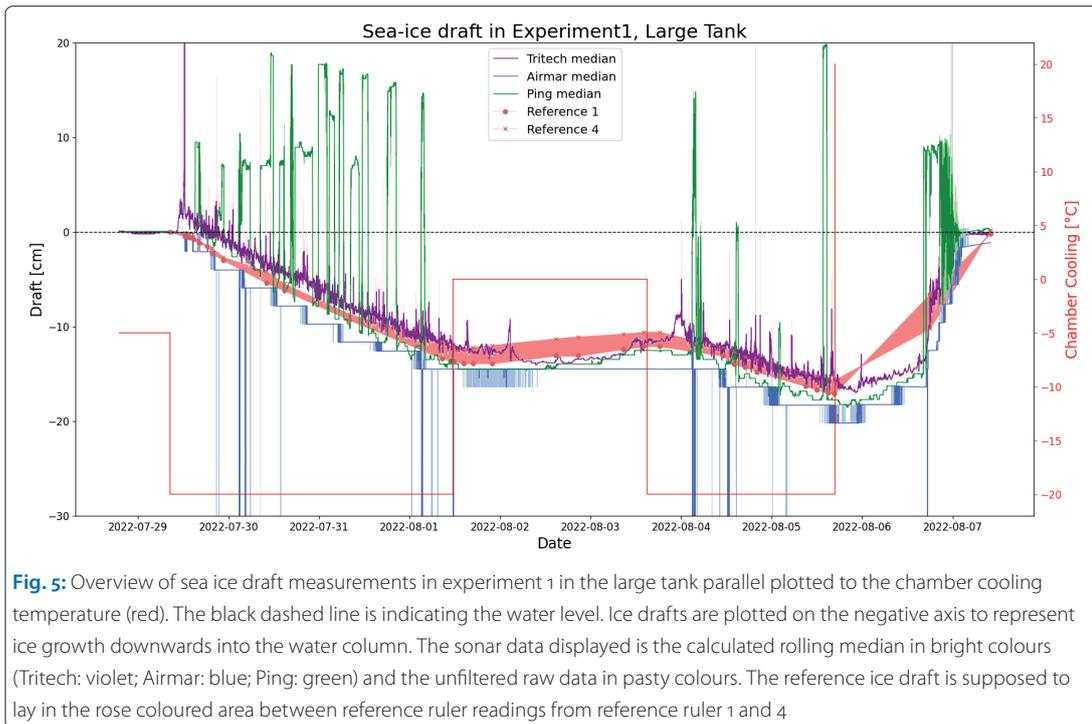
Apart from these key results, four critical points become most obvious: reference measurements underestimating actual draft extent; more coher-

Sensor	Frequency	Beamwidth	Min. Range	Resolution
Airmar EchoRange	200 kHz	9°	0.4 m	18.75 mm
Tritech PA500	500 kHz	6°	0.1 m	1 mm
BlueRobotics Ping	125 kHz	30°	0.5 m	4 mm

**Table 1:** Extract of sensor specifications of the three used echo sounders



**Fig. 4:** From left to right: Tritech PA500, BlueRobotics Ping, Airmar EchoRange



**Fig. 5:** Overview of sea ice draft measurements in experiment 1 in the large tank parallel plotted to the chamber cooling temperature (red). The black dashed line is indicating the water level. Ice drafts are plotted on the negative axis to represent ice growth downwards into the water column. The sonar data displayed is the calculated rolling median in bright colours (Tritech: violet; Airmar: blue; Ping: green) and the unfiltered raw data in pasty colours. The reference ice draft is supposed to lay in the rose coloured area between reference ruler readings from reference ruler 1 and 4

ent ice detection during the warm period; outliers and erroneous detections of all three echo sounders especially during ice growth; and Tritech discrepancy during initial ice formation and remaining offset when measuring on sea ice. The following second main experiment, conducted under similar conditions, proofed reproducibility of the measured phenomena and third experiment, conducted with a lower initial salinity, shows similar behaviour of the echo sounder data as observed before but making some effects even clearer.

To further investigate the Tritechs unintuitive behaviour at the beginning of ice growth and the remaining offset of 2 cm, a fourth side experiment in the large tank has been conducted. The recorded data confirms that the Tritech discrepancies of measuring too long distances only occur when measuring on saline sea ice.

### Accuracy evaluation

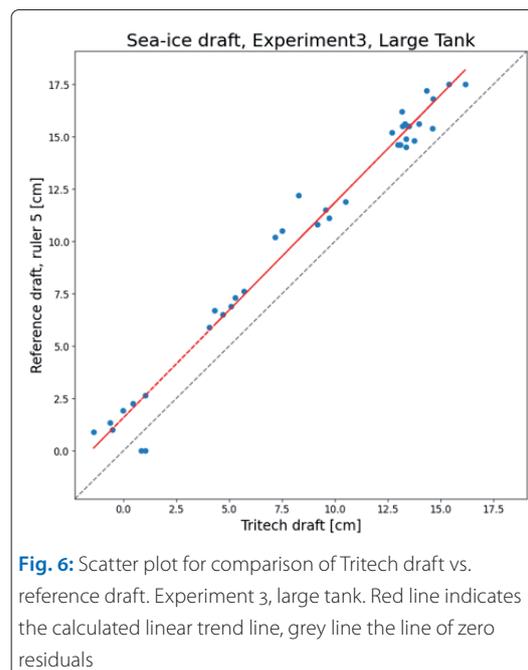
Comparing the calculated root mean square error (RMSE) values of all echo sounder measurements during the different experiment periods, it becomes obvious, that the physical state of sea ice has a dominant impact on acoustic reflectivity and instruments precision. Generally, all instruments show more coherent ice detection during warm periods according to the RMSE values presented in Table 2. These conclusions fit to previously reported findings on sea ice reflectivity studies from Jezek et al. (1990) and Stanton et al. (1986).

The sea ice draft comparison to the reference measurements obtained from ruler readings delivered accuracy measures for all echo sounders.

Sensor	Freezing periods	Warm periods
Airmar EchoRange	$\pm 2.5$ cm to $\pm 5.7$ cm	$\pm 0.2$ cm to $\pm 0.3$ cm
Tritech PA500	$\pm 1.1$ cm to $\pm 7.7$ cm	$\pm 0.3$ cm to $\pm 0.8$ cm
BlueRobotics Ping	$\pm 2.4$ cm to $\pm 11.2$ cm	$\pm 0.3$ cm to $\pm 0.4$ cm

**Table 2:** RMSE values of instruments during different experiment periods

An example of a draft comparison between the Tritech data and reference readings during the third main experiment is given in Fig. 6. The 2 cm offset becomes clearly visible and calculated residual values confirm the offset. The calculated re-



**Fig. 6:** Scatter plot for comparison of Tritech draft vs. reference draft. Experiment 3, large tank. Red line indicates the calculated linear trend line, grey line the line of zero residuals

Sensor	Residuals measuring on ice	Sensor resolution
Airmar EchoRange	-0.5 cm to +1.9 cm	1.9 cm
Tritech PA500	-1.6 cm to +1.9 cm	0.1 cm
BlueRobotics Ping	-0.3 cm to +1.0 cm	0.4 cm

**Table 3:** Range of residuals per sensor as accuracy measure in comparison to the sensor’s individual resolution

iduals for all three sonars are displayed in Table 3. The Airmar EchoRange is measuring the sea ice underside with an accuracy in the range of its own instrumental resolution. The Ping Sonar also delivers accuracy values close to its resolution as long as the obvious erroneous detections are excluded. After subtraction of the constant offset of 2 cm when measuring on sea ice, the Tritech PA500 data set delivers an accuracy up to twenty times of the instruments stated resolution during freezing periods, however, improved accuracy is observed during periods of warm ice.

Apart from this sensor individual accuracy evaluations another general finding can be stated from the residuals: as the residuals are mainly positive, the echo sounder measurements generally underestimate draft extent observed by reference readings. Conclusively, the acoustic waves are not reflected at visually observed ice underside but penetrate into the ice in range of the skeletal layer thickness.

## Conclusion

The idea of this work, using commercial echo sounders – originally designed for water depth measurements – for close-range determination of sea ice thickness, can be confirmed to be appropriated. A draft accuracy of  $\pm 0.5$  cm is reached by the implemented method under specific conditions. The accuracy of inferred sea ice draft is shown to be strongly dependent on frequency, as acoustic scattering from the sea ice underside becomes less coherent the higher the operational frequency of the sonar is. The sonars with lower frequency show more coherent reflections from sea ice determining the ice draft with higher accuracy in scale of the instrument’s vertical resolution. A strong relation between the acoustic reflectivity of the sea ice underside and the physical condition of sea ice is determined. Warm, porous sea ice is identified being a more resilient reflector for acoustic range detection than sea ice in the freezing process. By further analysing the signal return strength improvements of the sea ice underside detection are expected. Furthermore, this study shows that echo sounders acoustic waves penetrate into the water-ice transition layer in range of the skeletal layer thickness before being reflected. The presented work concludes that the acoustic approach for determining sea ice draft thickness is applicable using frequencies of 115 kHz or 200 kHz. //

## Acknowledgment

I want to express my thanks to Niels Fuchs from the Sea Ice Research Group of Uni Hamburg, bringing up the idea of this investigation, making this cooperation possible and teaching me a lot of background knowledge about sea ice and physical experiments. Furthermore, I want to thank my supervising professor Jochen Schiewe from HCU for advising me in scientific writing and working.

## References

Bassett, Christopher; Andone C. Lavery; Anthony P. Lyons; Jeremy P. Wilkinson; Ted Maksym (2020): Direct inference of first-year sea ice thickness using broadband acoustic backscattering. *The Journal of the Acoustical Society of America*, DOI: 10.1121/10.0000619

Bassett, Christopher; Andone C. Lavery; Ted Maksym; Jeremy P. Wilkinson (2016): Broadband acoustic backscatter from crude oil under laboratory-grown sea ice. *The Journal of the Acoustical Society of America*, DOI: 10.1121/1.4963876

Golden, Kenneth M.; Luke G. Bennetts; Elena Cherkaev et al. (2020): Modeling Sea Ice. *Notices of the American Mathematical Society*, DOI: 10.1090/noti2171

Jezeq, K. C.; Timothy K. Stanton; A. J. Gow; M. A. Lange (1990): Influence of environmental conditions on acoustical properties of sea ice. *The Journal of the Acoustical Society of America*, DOI: 10.1121/1.400213

Petrich, Chris; Hajo Eicken (2010): Growth, Structure and Properties of Sea Ice. In: *Sea ice*. Wiley-Blackwell, DOI: 10.1002/9781444317145.ch2

Stanton, Timothy K. ; K. C. Jezeq; A. J. Gow (1986): Acoustical reflection and scattering from the underside of laboratory grown sea ice: Measurements and predictions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, DOI: 10.1121/1.394404

Wadhams, Peter; Georgios T. Amanatidis (eds.) (2007): *Arctic sea ice thickness: Past, present and future*. Publications Office of the European Communities, 293 pp.

# 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

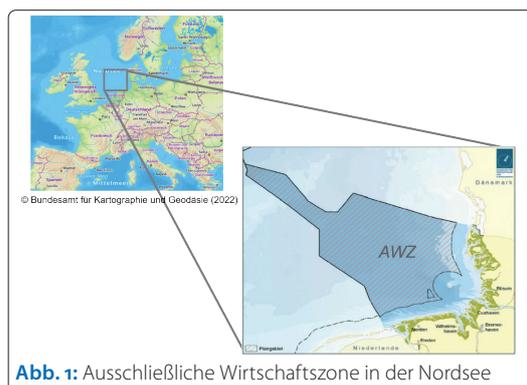


Abb. 1: Ausschließliche Wirtschaftszone in der Nordsee

## 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

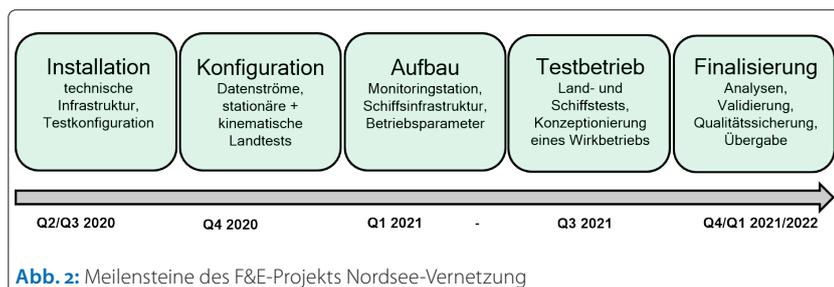


Abb. 2: Meilensteine des F&E-Projekts Nordsee-Vernetzung

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

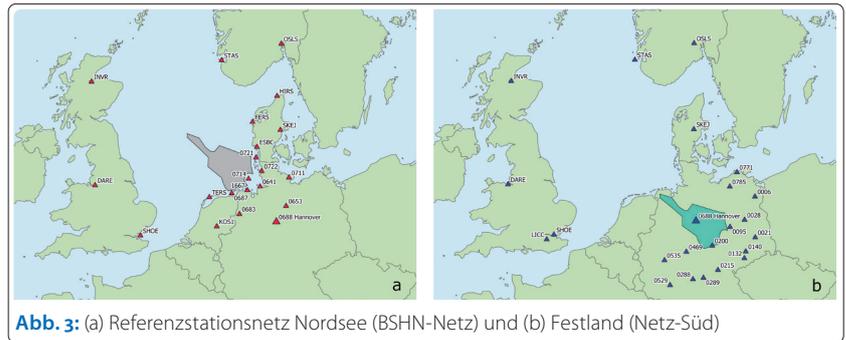


Abb. 3: (a) Referenzstationsnetz Nordsee (BSHN-Netz) und (b) Festland (Netz-Süd)

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-

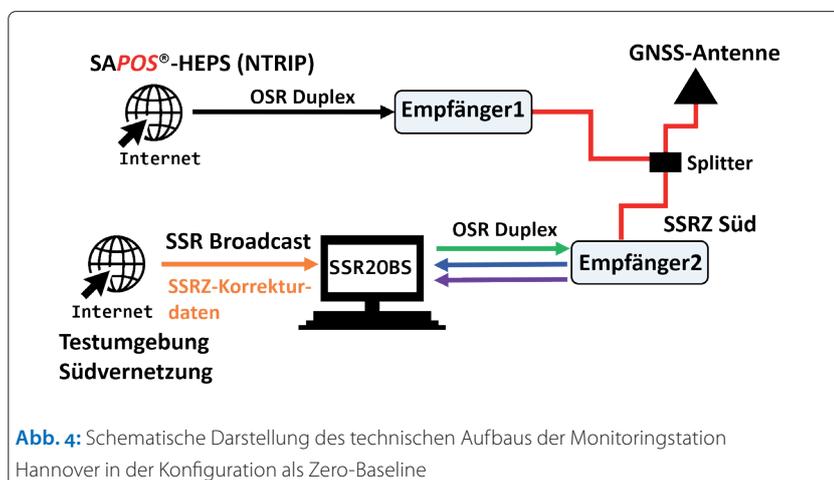


Abb. 4: Schematische Darstellung des technischen Aufbaus der Monitoringstation Hannover in der Konfiguration als Zero-Baseline

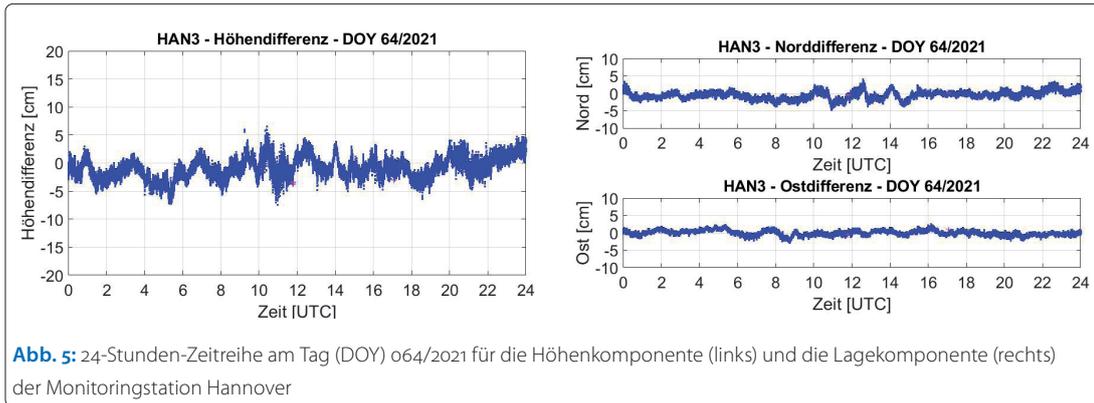


Abb. 5: 24-Stunden-Zeitreihe am Tag (DOY) 064/2021 für die Höhenkomponente (links) und die Lagekomponente (rechts) der Monitoringstation Hannover

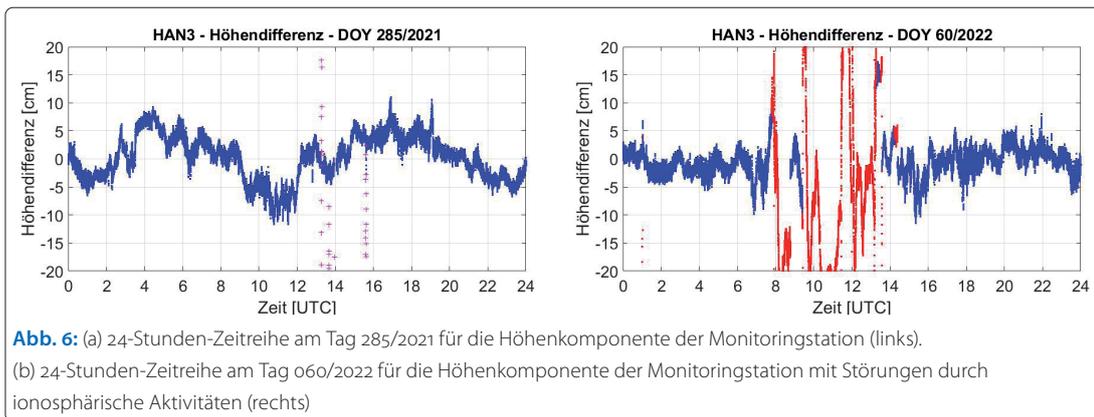


Abb. 6: (a) 24-Stunden-Zeitreihe am Tag 285/2021 für die Höhenkomponente der Monitoringstation (links).  
(b) 24-Stunden-Zeitreihe am Tag 060/2022 für die Höhenkomponente der Monitoringstation mit Störungen durch ionosphärische Aktivitäten (rechts)

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.

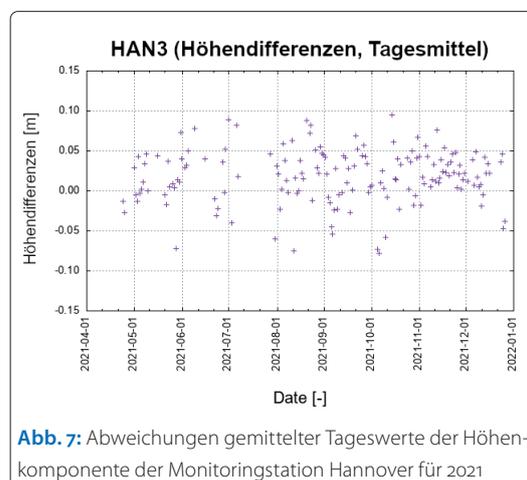
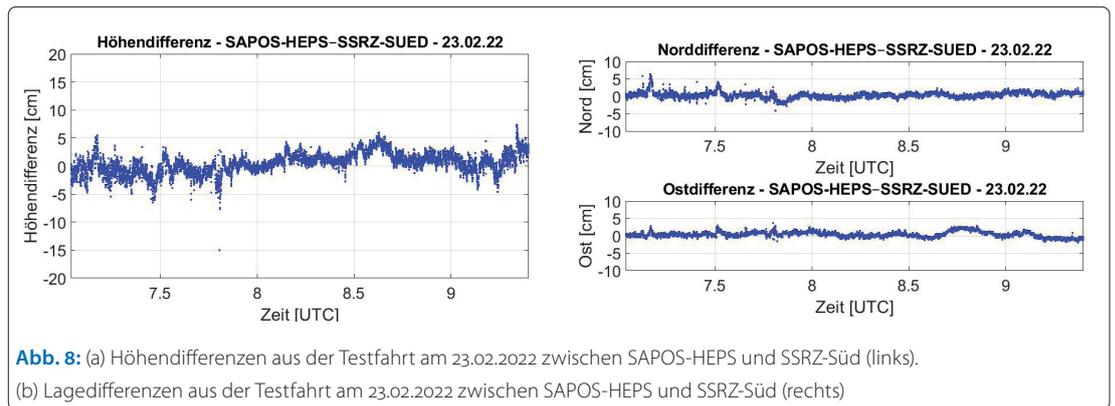


Abb. 7: Abweichungen gemittelter Tageswerte der Höhenkomponente der Monitoringstation Hannover für 2021



## 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-

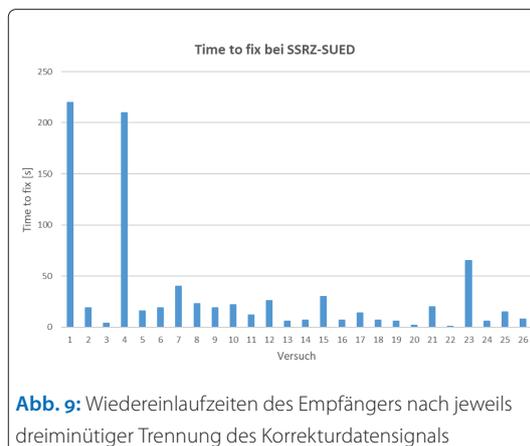


Abb. 9: Wiedereinlaufzeiten des Empfängers nach jeweils dreiminütiger Trennung des Korrekturdatensignals

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

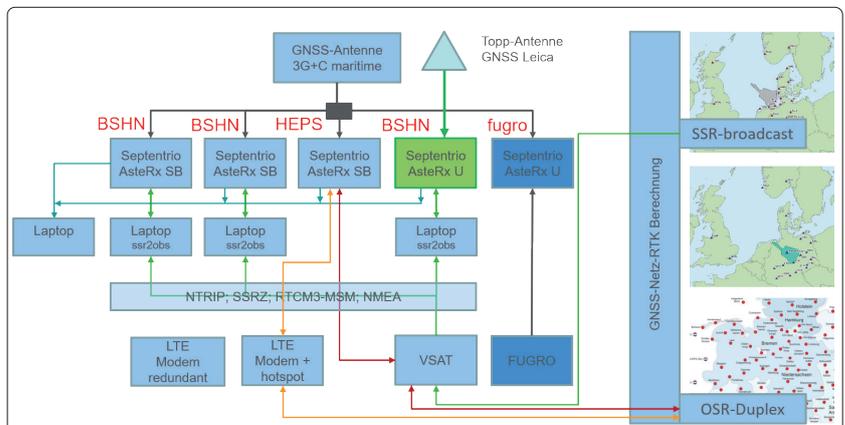
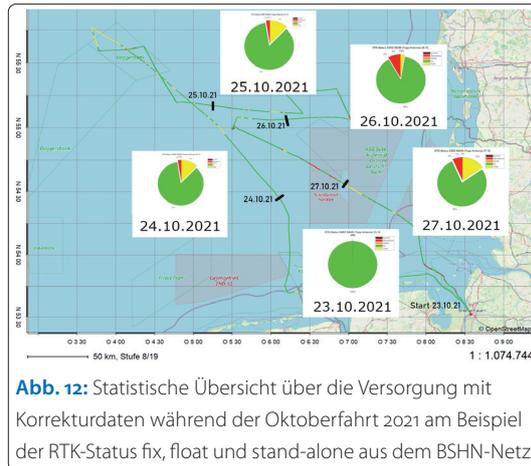


Abb. 11: Konfiguration der GNSS-Empfänger, Notebooks und Kommunikationseinrichtungen auf dem VWFS *WEGA* während der Testfahrt im Oktober 2021

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



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.

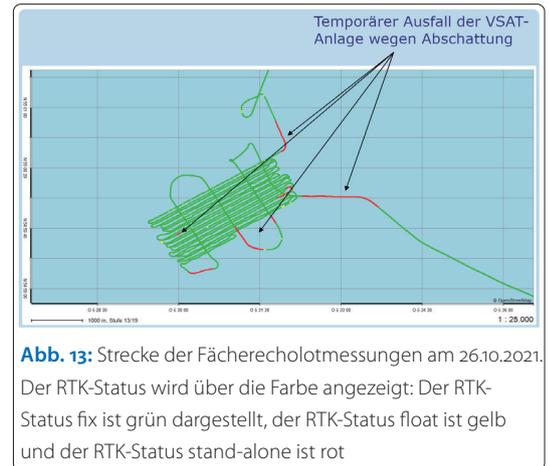
Mit durchschnittlich 87,4 % aller RTK-fix-Lösungen für die gesamte Messfahrt wurde ein sehr hoher Qualitätsstandard erreicht. Am 24. Oktober 2021 wurde die äußerste Spitze der AWZ befahren. Die geringere Anzahl der RTK-Status-fix-Daten ist darauf zurückzuführen, dass zu diesem Zeitpunkt eine zu geringe 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



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  $140^\circ$  (ca.  $\pm 5^\circ$ ) 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 Fächerchotvermessung. 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

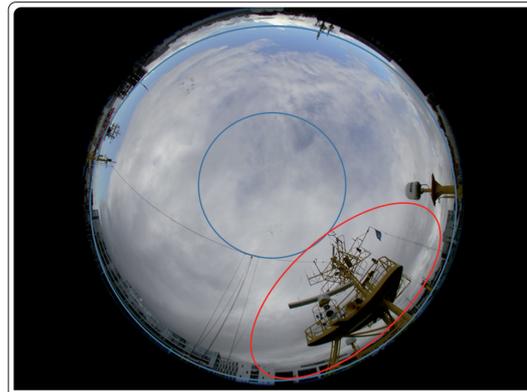
Abschattungen und Signalstörungen wurden analysiert. Die Abweichungen von einem mittleren CNO wurden auf  $\pm 6$  dB-Hz begrenzt, als Skyplot dargestellt und auf den Standort der GNSS-Antenne zentriert sowie orientiert.

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.

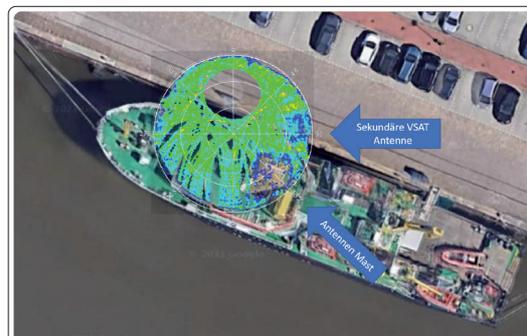
## 8 Ergebnisse im Koordinatenraum

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+.

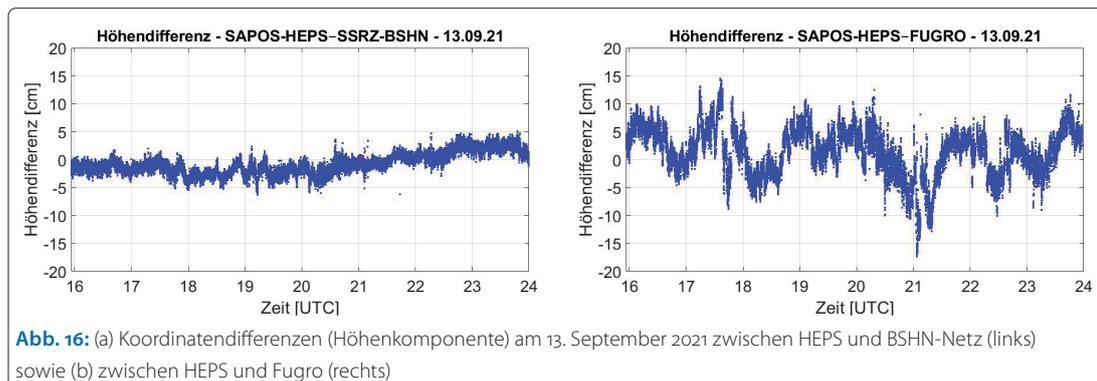


**Abb. 14:** Skyplot mit Fisheye-Objektiv aus der Perspektive der GNSS-Antenne auf dem Peildeck des VWFS WEGA

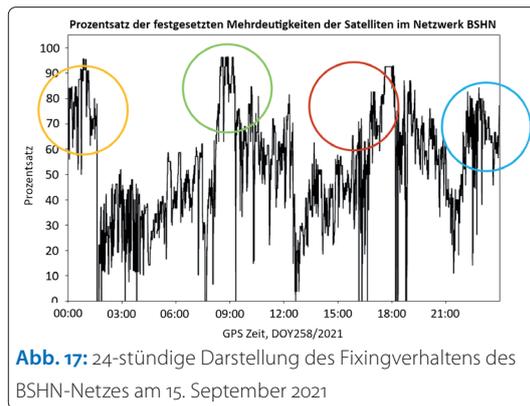


**Abb. 15:** Abschattung durch den Antennenmast des VWFS WEGA und der Primäranterie der VSAT-Anlage am Beispiel von Multi-GNSS-L1-Frequenzen

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.



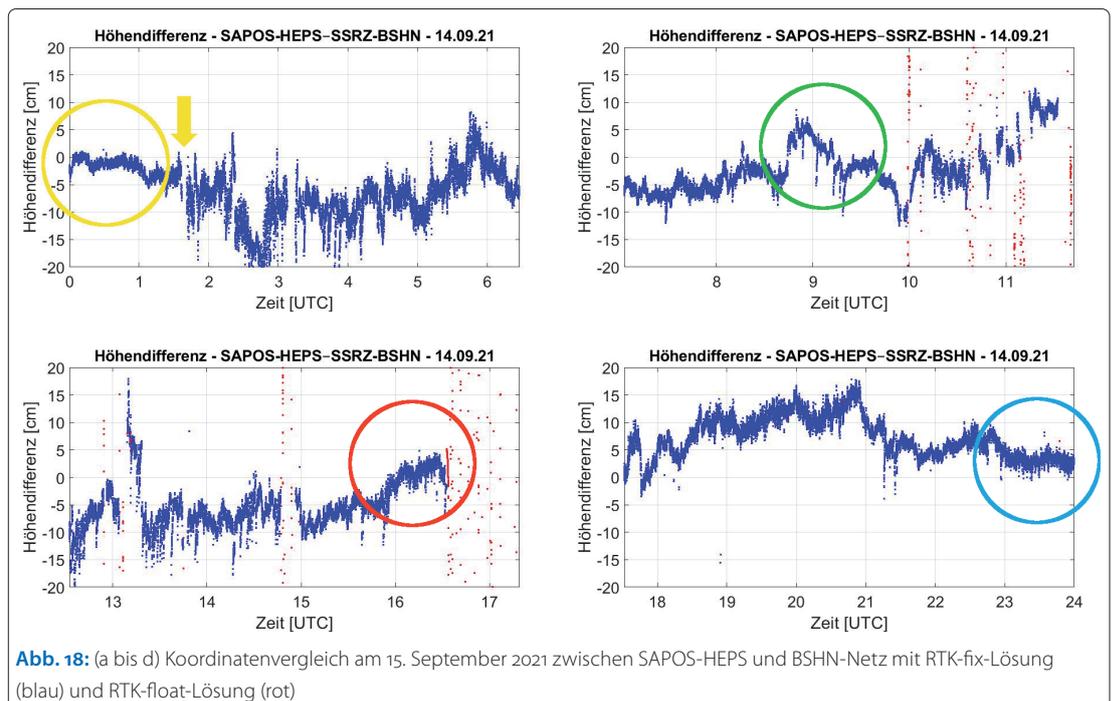
**Abb. 16:** (a) Koordinatendifferenzen (Höhenkomponente) am 13. September 2021 zwischen HEPS und BSHN-Netz (links) sowie (b) zwischen HEPS und Fugro (rechts)

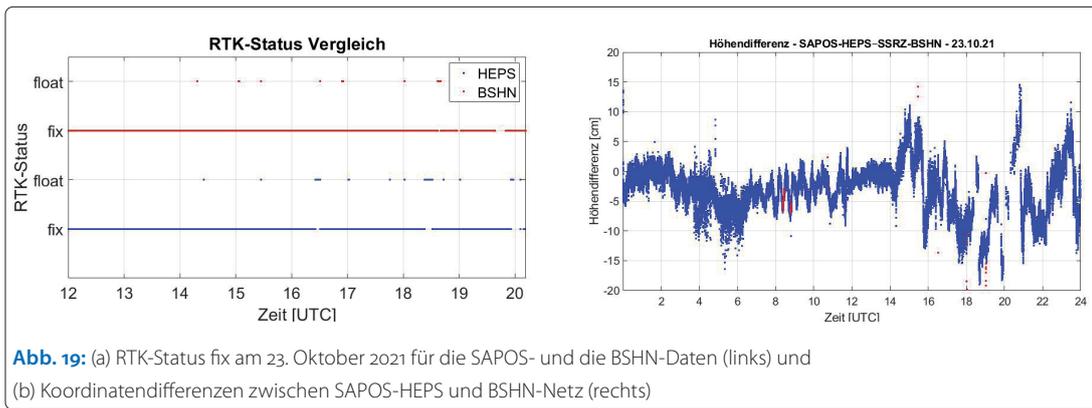


Die Berechnung von SSR-Korrekturdaten aus dem BSHN-Netz erfolgt in der Software GNSMART. Neben den Korrekturdaten werden auch umfangreiche Qualitätsinformationen bereitgestellt, die zur Beurteilung der Betriebsperformanz herangezogen werden können. [Abb. 17](#) zeigt eine 24-stündige Darstellung der 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

# Vergleich von Positionierungsdiensten im Offshore-Bereich

Ein Beitrag von SEBASTIAN KNAPPE, GUNTER LIEBSCH, LUDWIG SCHRÖDER, TOBIAS PETER BAUER, AXEL RÜLKE, PETER NEUMAIER und PATRICK WESTFELD

Die Digitalisierung hält in einer stetig wachsenden Anzahl von Anwendungsbereichen Einzug. In diesem Zuge wächst auch der Bedarf an genauen Positionsangaben immer weiter an. Eine Vielzahl von Anwendungen, wie z. B. autonome Mobilität, digitale Landwirtschaft (Precision Farming), Monitoring von Infrastruktureinrichtungen, aber auch klassische Vermessungsaufgaben der Katastervermessung erfordern heutzutage genaue, zuverlässige und schnell verfügbare Koordinatenangaben in Lage und Höhe. Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen ist in den letzten Jahren eine Reihe von Positionierungsdiensten unterschiedlicher Anbieter auf den Markt gekommen. Sie versprechen die Positionierung in Echtzeit mit einer Genauigkeit im Zentimeter- oder Subdezimeterbereich durch die Bereitstellung von Korrekturdaten für die Globalen Satellitennavigationssysteme (GNSS). Im Rahmen einer Messkampagne an Bord des VWFS WEGA des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie konnten vier Positionierungsdienste genutzt und verglichen werden. Der Artikel gibt einen praxisorientierten Überblick der dabei gesammelten Erfahrungen.

GNSS | Positionierungsdienst | Real-Time Kinematic | Precise Point Positioning | Ntrip  
GNSS | correction service | real-time kinematic | precise point positioning | Ntrip

Digitalisation is taking its place in a steadily growing number of fields of applications. In this context, the need for precise positioning information is also continuously increasing. A variety of applications, such as autonomous mobility, digital agriculture (precision farming), monitoring of infrastructure, but also conventional surveying tasks of cadastral surveying nowadays require precise, reliable and quickly available coordinate information in position and height. Against this background of these developments, a number of correction services from different providers have been released in recent years. They promise real-time positioning with centimetre or sub-decimetre accuracy by providing correction data for the Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Within the framework of a measurement campaign on board of the VWFS WEGA of the Federal Maritime and Hydrographic Agency, four correction services were used and compared. This article provides a practice-oriented overview of the experience gained.

## Autoren

Sebastian Knappe, Dr. Gunter Liebsch, Dr. Ludwig Schröder, Tobias Peter Bauer, Dr. Axel Rülke und Peter Neumaier arbeiten beim Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in Leipzig und Frankfurt am Main.  
Dr. Patrick Westfeld arbeitet beim Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Rostock.

sebastian.knappe@bkg.bund.de

## 1 Einleitung

Zu den Aufgaben des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG) als zentraler Dienstleister des Bundes gehören die Definition, Realisierung und Bereitstellung geodätischer Referenzsysteme. In diesen Aufgabenbereich ordnen sich eine Vielzahl von Arbeiten im GNSS-Bereich von der Datenerfassung, der Berechnung von Referenzrahmen bis zur Mitwirkung an Positionierungsdiensten ein. Das BKG betreibt eigene GNSS-Referenzstationen, wie die Stationen des Integrierten Geodätischen Referenznetzes GREF (<https://gref.bkg.bund.de>). Mit den Daten der GNSS-Referenzstationen unterstützt das BKG die Bestimmung der Referenzrahmen auf globaler, europäischer und nationaler Ebene. Darüber hinaus ist das BKG selbst im Rahmen von EUREF ([www.euref.eu](http://www.euref.eu)) als Rechen- und Datenzentrum an der Bestimmung des European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) beteiligt.

Zur Übertragung von Beobachtungen und Korrekturdaten im GNSS-Bereich wurde im Jahr 2004 der Ntrip-Standard (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) als zugrunde liegendes Transportprotokoll von der Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) verabschiedet. Das BKG hat maßgeblich an der Entwicklung dieses Standards und dessen Verbreitung mitgewirkt (Weber et al. 2004). Neue Konzepte der Korrekturdatenübertragung werden die Skalierbarkeit für Positionierungsdienste weiter verbessern. Hier sind z. B. die Datenübertragung über einen Datenkanal des Digitalradios DAB+ oder über verschiedene Ebenen der Mobilfunksignale, wie sie durch das 3rd Generation Partnership Project (3GPP, [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org)) beschrieben werden, in der Entwicklung. Die Bereitstellung von GNSS-Daten in Form offener Formate wird vom BKG seit vielen Jahren aktiv unterstützt. Die GNSS-Caster des BKG

GNSS Data Centers (<https://igs.bkg.bund.de>) erlauben den Zugriff auf Echtzeit-Beobachtungsdaten weltweit verteilter GNSS-Referenzstationen des Internationalen GNSS-Dienstes (IGS).

Das BKG ist am Echtzeitdienst des IGS (<https://igs.org>) als Daten-, Analyse- und Kombinationszentrum beteiligt. Die offene Bereitstellung von Satellitenbahn- und Satellitenuhrparametern durch die IGS-Analysezentren ermöglicht aktuell eine Positionierungsgenauigkeit im Dezimeterbereich bei einer Konvergenzzeit von etwa 30 Minuten. Eine hohe Genauigkeit im Bereich weniger Zentimeter sowie eine Konvergenzzeit im Bereich weniger Minuten ist das Ziel eines neuen Satellitenpositionierungsdienstes der Vermessungsverwaltungen in Deutschland. Unter dem Dach der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) bauen das BKG und die Landesvermessungen einen Positionierungsdienst unter Nutzung von Precise Point Positioning (PPP) auf (Riecken und Becker 2020). Zur Steigerung der Verfügbarkeit wird dieser Dienst an zwei Rechenstellen, einmal am BKG und einmal an der Zentralen Stelle SAPOS beim LGLN Niedersachsen, Korrekturdaten berechnen. Die Redundanz und Verfügbarkeit soll durch Ausnutzung von zwei Übertragungswegen, über Internet (Ntrip) und Digitalradio DAB+, erhöht werden. Die Echtzeitpositionierung in den küstenfernen Gebieten der Nordsee stellt unter anderem aufgrund des Fehlens eines engmaschigen Referenzstationsnetzes eine Herausforderung dar. Am LGLN Niedersachsen wird daher eine spezielle Vernetzung für die deutsche Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) in der Nordsee entwickelt (Jahn et al. 2022).

Satellitenpositionierungsdienste, insbesondere der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung SAPOS (Riecken und Kurtenbach 2017), werden am BKG auch im Rahmen eigener Messprojekte eingesetzt. Ein Beispiel hierfür sind die gravimetrischen Vermessungsarbeiten zur Bestimmung der Höhenbezugsflächen, dem German Combined Quasigeoid (GCG) (Schirmer et al. 2018) und dem Baltic Sea Chart Datum (BSCD2000) im Bereich von Nord- und Ostsee (Schwabe et al. 2020; Liebsch et al. 2022). Hierfür werden in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und dem Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ) seit 2013 regelmäßig Messkampagnen durchgeführt. Das Primärziel solcher Kampagnen ist die Erhebung von Schweredaten zur Bestimmung und Verbesserung der Höhenbezugsfläche. Im Zeitraum vom 28.06. bis zum 07.07.2022 wurde eine Messkampagne in der deutschen AWZ in der Nordsee an Bord des Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiffes (VWFS) *WEGA* des BSH durchgeführt. Zusätzlich zur Erhebung von Schweredaten wurde diese Fahrt genutzt, um

praktische Erfahrungen mit den Anbietern einiger Positionierungsdienste zu sammeln. Im Vordergrund standen praxisorientierte Fragestellungen wie Nutzungsvoraussetzungen, Empfangsmöglichkeiten auf See, Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Dienste, aber auch die erreichbare Konsistenz der Koordinaten mit dem amtlichen Raumbezug. Mit steigenden Genauigkeitsansprüchen in der Größenordnung weniger Zentimeter gewinnt die letztgenannte Zielsetzung zunehmend an Bedeutung.

Im Folgenden soll ein Eindruck über die gewonnenen Erfahrungen und empirischen Ergebnisse aus diesen Messungen vermittelt werden. In Abschnitt 2 werden die Spezifika der untersuchten Positionierungsdienste mit Fokus auf die Anwendung im Offshore-Bereich zusammengefasst. Anschließend wird die technische Realisierung an Bord der *WEGA* beschrieben (Abschnitt 3), woraufhin die Darlegung der Analysen zur Bewertung der an Bord erreichten Zuverlässigkeit und Genauigkeit in der Positionierung erfolgt (Abschnitt 4).

## 2 Überblick der verwendeten Positionierungsdienste

Im Rahmen der Messkampagne bestand die Möglichkeit, die Positionierungsdienste Trimble CenterPoint RTX Marine, NovAtel Oceanix, Fugro Marinestar und SAPOS HEPS zu nutzen. Die beiden letztgenannten werden im Routinebetrieb der *WEGA* zur Seevermessung verwendet. Weitere Dienste wie z. B. von den Anbietern Hemisphere GNSS, swift navigation, u-blox oder VERIPOS etc. hätten den Rahmen und die Möglichkeiten dieses Messprojektes überschritten und wurden deshalb nicht getestet. Dieser Beitrag kann und will deshalb keinen vollständigen Überblick aller im Bereich der deutschen AWZ in der Nordsee verfügbaren Positionierungsdienste geben.

Positionierungsdienste unterscheiden sich in der Art der Korrekturdaten. Beim RTK-Verfahren (Real-Time Kinematic) stellt der Korrekturdienst dem Nutzer die Satellitenbeobachtungen einer nahegelegenen physischen oder virtuellen Referenzstation bereit. Dafür muss seitens des Dienstleisters die Position des Nutzers bekannt sein, weshalb für diese Positionierungsdienste bidirektionale Verbindungen (Internetverbindung) erforderlich sind. Mit dem Ausbau der Windparks in der Nordsee wächst auch das Versorgungsgebiet für Mobilfunk. Für küstenferne Internetnutzung ist auf Schiffen eine satellitengestützte Internetverbindung (VSAT) notwendig. Das RTK-Verfahren wird derzeit beim SAPOS angeboten. Die individuelle Berechnung von Korrekturdaten für jeden einzelnen Nutzer limitiert die Skalierbarkeit klassischer RTK-Dienste. Erst PPP (Precise Point Positioning) ermöglicht eine Massennutzung der Korrekturdaten, die nutzerunabhängig und damit allgemeingültig

für ganz Deutschland ausgesendet werden. PPP-Dienste stellen den Nutzern einheitliche Korrekturdaten für das Versorgungsgebiet bereit. Da hierfür beim Dienstbetreiber keine Kenntnis über die Position des Nutzers nötig ist, können die Daten über ein Broadcastmedium übertragen werden. Anbieter von PPP-Korrekturdiensten nutzen heute vielfach geostationäre Satelliten zur Ausstrahlung der Korrekturinformationen, die eine Trägerfrequenz im Bereich der GNSS-Frequenzen verwenden (L-Band). Bei dieser Technik kann auf zusätzliches Empfangsequipment verzichtet werden, da die Korrekturdaten mittels GNSS-Antenne empfangen werden. Neben Internetverbindungen mittels VSAT stellt dies eine zuverlässige Möglichkeit für den Korrekturdatenempfang in küstenfernen Seegebieten dar. Beide Systeme, L-Band und VSAT, sind auf der WEGA im Einsatz. Die satellitengestützte Übertragung von Korrekturdaten wird, vergleichbar zu Satellitenfernsehen (DVB-S), durch Gewitterfronten beeinträchtigt.

Im Gegensatz zum RTK-Verfahren eignen sich PPP-Dienste meist nicht für sofortige Messungen. Nach Einschalten des Empfängers oder nach einem längeren Verlust der Satellitensignale muss der Nutzer warten, bis die nominale Genauigkeit des Dienstes erreicht wird (Konvergenzzeit). Bei klassischen PPP-Diensten werden vorrangig Satellitenbahnen- und -uhrenkorrekturen an den Nutzer übermittelt. Auf diese Weise gelingt eine Positionierung mit Genauigkeiten im Dezimeterbereich bei Konvergenzzeiten von ca. 30 Minuten. Erst die Übertragung weiterer Informationen, wie z. B. hardwarebedingter Signallaufzeitverzögerungen oder Informationen zu ionosphärischen oder troposphärischen Einflüssen auf die Beobachtungssignale, erlaubt die Lösung der Phasenmehrtendigkeiten in Echtzeit und damit die signifikante

Steigerung der Genauigkeit und eine deutlich verkürzte Konvergenz. Dienste, welche dieses Verfahren nutzen, werden in der Literatur oft unter den Begriffen PPP-RTK oder SSR zusammengefasst (Wübbena et al. 2005; Li et al. 2022). Seitens der Anbieter wird diese Unterscheidung häufig nicht explizit vorgenommen.

Die wesentlichen Spezifika der in der Messkampagne verwendeten Dienste sind in [Tabelle 1](#) gegenübergestellt. Trimble CenterPoint RTX Marine (im Folgenden RTX genannt) wird von der Trimble Inc. angeboten und stellt die Erweiterung des an Land verfügbaren Trimble CenterPoint RTX-Dienstes im küstennahen Bereich bis 100 Seemeilen bereit. Im angegebenen Versorgungsgebiet ist die gesamte deutsche AWZ enthalten. Auch die NovAtel Inc. bietet mit dem Dienst NovAtel Oceanix (nachfolgend als Oceanix bezeichnet) eine Versorgung in Küstennähe an. Die Grenze des Versorgungsbereiches wird mit 60 km Entfernung zur Küstenlinie angegeben. Fugro Marinestar (Fugro), der dritte an Bord genutzte PPP-Dienst, ist ein globaler maritimer Dienst. Neben den PPP-Diensten wurde der hochpräzise Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung SAPOS HEPS (SAPOS) eingesetzt. Während an Land für SAPOS HEPS ein Referenzstationsnetzwerk mit einem Stationsabstand von maximal 60 km betrieben wird, befindet sich die am weitesten vom Festland entfernte Referenzstation in der Nordsee auf der Insel Helgoland. Bei der Nutzung des Dienstes in der AWZ, insbesondere im »Entenschnabel«, muss dieser Umstand berücksichtigt werden.

Das entscheidende Qualitätsmerkmal einer Positionsbestimmung ist die erreichte Genauigkeit. Fehlereinflüsse auf die Koordinatenlösungen sind in der Regel autokorreliert, das heißt die Koordinate einer einzelnen Epoche wird sowohl durch

	Trimble CenterPoint RTX Marine	NovAtel Oceanix	Fugro Marinestar	SAPOS HEPS
<b>Anbieter</b>	Trimble Inc.	NovAtel Inc.	Fugro	Deutsche Landesvermessung
<b>Art</b>	PPP	PPP	PPP	RTK
<b>Unterstützte GNSS</b>	GPS Galileo GLONASS BeiDou	GPS Galileo GLONASS BeiDou	GPS Galileo GLONASS BeiDou	GPS Galileo GLONASS BeiDou
<b>Genauigkeit horizontal</b>	<2 cm	2,5 cm	1,7 cm N / 2 cm O	1 bis 2 cm
<b>Genauigkeit vertikal</b>	<5 cm (RMS)	5 cm (95 %)	5,2 cm (95 %)	2 bis 3 cm (k. A.)
<b>Konvergenzzeit</b>	15 Minuten	3 Minuten	ca. 35 Minuten	–
<b>Reichweite auf See</b>	bis ca. 200 km vor der Küste	bis 60 km vor der Küste	globaler maritimer Dienst	keine Angabe
<b>Empfangstechnik</b>	aktuelle Trimble-Empfänger	Empfänger mit NovAtel 7-OEM-Board mit RTK-Option	unterstützt von verschiedenen Empfängerherstellern	beliebiger 2-Frequenz-RTK-Empfänger
<b>Korrekturdatenempfang</b>	Internet (Ntrip) L-Band	Internet (Ntrip) L-Band	Internet (Ntrip) L-Band	Internet (Ntrip)

**Tabelle 1:** Vergleich der verwendeten Positionierungsdienste anhand von ausgewählten Kriterien. Im Fokus stehen Charakteristika, welche für die Verwendung der Dienste zur Positionierung im deutschen Seegebiet relevant sind. Die Angaben sind den Webseiten und Broschüren der Anbieter entnommen

zufällige als auch durch kurz- und längerfristige systematische Fehler beeinflusst. Die Betreiber der Positionierungsdienste verwenden unterschiedliche statistische Parameter bei der Angabe der zu erwartenden Genauigkeit ihrer Dienste (siehe [Tabelle...1](#)). Neben der Standardabweichung wird häufig die Breite des 95%-Konfidenzintervalls angegeben. Bei der statistischen Beurteilung statischer Messungen über einen längeren Messzeitraum ist die Standardabweichung gegenüber dem langzeitigen Mittelwert eine übliche Genauigkeitsangabe. Für kinematische Messungen an Bord eines Schiffes oder in einem Flugzeug ist eine Mittelbildung über mehrere Epochen jedoch nicht möglich. Für kinematische Anwendungen ist deshalb die Verwendung der doppelten oder dreifachen Standardabweichung als Qualitätsparameter sinnvoller. Beim Vergleich der Genauigkeitsangaben der verschiedenen Anbieter sollten diese Unterschiede berücksichtigt werden. Im Folgenden liegt allen berechneten Fehlermaßen die doppelte Standardabweichung zugrunde. Unter Annahme einer Normalverteilung der Messfehler entspricht die doppelte Standardabweichung dem 95%-Quantil.

Besondere Umwelteinflüsse wie Gewitterfronten oder hohe Ionosphärenaktivität schränken die erreichbare GNSS-Genauigkeit zusätzlich ein. Daher geben die Dienstanbieter ihre Genauigkeitsmaße in der Regel als »unter optimalen Bedingungen erreichbare Werte« an. Neben den Charakteristika der Dienste haben auch die Auswahl der GNSS-Technik und die Konfiguration der Empfänger einen Einfluss auf die Genauigkeit und Konsistenz der gemessenen Koordinaten. Seitens der kommerziellen PPP-Dienste gibt es daher Einschränkungen, welche Geräte mit den Diensten genutzt werden können. Listen der unterstützten Empfängertypen sind auf den Webseiten der Anbieter zu finden. Empfängereinstellungen erlauben unter anderem die Auswahl der verwendeten Satellitensysteme und GNSS-Signale, die Festlegung des geodätischen Referenzsystems der Ergebniskoordinaten und die Verwendung von Positionsfiltren.

Alle hier verwendeten Dienste versprechen eine vergleichbare Genauigkeit im Zentimeterbereich. Deshalb ist eine strikte Unterscheidung der verschiedenen geodätischen Referenzsysteme beim Koordinatenvergleich zwingend erforderlich. Ein Kriterium unseres Tests war deshalb die Überprüfung möglicher systematischer Unterschiede der mit den Diensten bestimmten Positionslösungen zum amtlichen Raumbezug. Während beim SAPOS Angaben zum Referenzsystem übertragen werden und die Positionslösung im amtlichen Raumbezug (ETRS89/DREF91 Realisierung 2016) vorliegt, erfolgt die Wahl des Referenzsystems bei Nutzung der PPP-Dienste am Empfänger. Entsprechende

Transformationen zwischen den verschiedenen Referenzsystemen müssen im GNSS-Empfänger implementiert sein. Je nach Empfängertyp und -firmware kann meist zwischen mehreren international und regional gültigen Systemen gewählt werden. Beispielsweise unterstützt der verwendete Leica GS25 Rover unter anderem das zum Zeitpunkt der Kampagne aktuelle internationale Referenzsystem ITRF2014 und die verschiedenen Realisierungen des European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89). Die Transformationsparameter zwischen diesen Referenzrahmen werden vom Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) im Rahmen von EUREF veröffentlicht (<http://etrs89.ensg.ign.fr>). Zur konsistenten Nutzung des amtlichen Raumbezugs muss dieser als neues Koordinatensystem im Empfänger definiert werden. Die Transformationsparameter werden von der AdV online zur Verfügung gestellt ([www.adv-online.de/AdV-Produkte/Integrierter-geodätischer-Raumbezug/Transformationsparameter](http://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Integrierter-geodätischer-Raumbezug/Transformationsparameter)).

### 3 Aufbau der GNSS-Empfangstechnik an Bord der WEGA

Während der Messkampagne wurden verschiedene Experimente an Bord der WEGA durchgeführt. Die primäre Aufgabe bestand in den Schweremessungen. Zusätzlich wurden mit drei Radarpegeln Daten zur Bestimmung des Meeresspiegels erhoben. Die Lage und Höhe aller Sensoren sowie der insgesamt sechs GNSS-Antennen wurden vor Fahrtbeginn eingemessen und die Hebelarme bzw. Exzentrizitäten bestimmt.

Die vier Positionierungsdienste wurden an zwei unterschiedlichen Antennenstandorten genutzt, welche in [Abb. 1](#) hervorgehoben sind. Der beste GNSS-Empfang ist auf einem Schiff im Mast zu erwarten, da hier nur minimale Abschattungen



**Abb. 1:** Bild des VWFS WEGA im Hafen von Bremerhaven. Markiert sind die verwendeten Antennen. A – Mastantenne des Typs Leica AX1202 GG; B und C – steuerbordseitige bzw. backbordseitige Antennen auf dem Peildeck des Typs navXperience 3G+C

durch Schiffsaufbauten den Satellitenempfang stören. An der Mastantenne der *WEGA* vom Typ Leica AX1202 GG wurden über einen GNSS-Splitter durch das BKG mehrere Empfänger betrieben. Die drei Positionierungsdienste RTX, Oceanix und SAPOS konnten so direkt miteinander verglichen werden.

Die Positionierung mit dem RTX-Dienst erfolgte mit einem Trimble MB-TWO-Empfänger, verbaut in einem Gerät der Firma Alberding GmbH (Firmware 4.11). Dieser erlaubte die Positionierung mit den Satellitensystemen GPS, Galileo und GLO-NASS. Zur Nutzung des Oceanix-Korrekturdienstes wurde ein Leica GS25-Empfänger (Firmware 11.00) und zur Positionierung mit SAPOS ein Javad TRE-3 Delta-Empfänger (Firmware 4.1.04-211206) verwendet. In beiden Fällen trug neben GPS, Galileo und GLONASS auch das chinesische Satellitensystem BeiDou zur Positionsbestimmung bei.

Das Vermessungssystem der *WEGA* nutzt einen 2-Antennen-Empfänger des Typs Septentrio AsteRxU marine, welcher an zwei GNSS-Antennen vom Typ navXperience 3G+C auf dem Peildeck des Schiffes angeschlossen ist. Mittels dieses Empfängers konnte der Dienst der Firma Fugro verwendet werden. Die ermittelte Koordinate bezieht sich auf die steuerbordseitige Antenne.

Die Einwahl beim SAPOS-Server erfolgte über die VSAT-Anlage des Schiffes. Genutzt wurde das VRS-Verfahren über die Einwahl der Zentralen Stelle SAPOS. Der Korrekturdatenempfang für die drei PPP-Dienste RTX, Oceanix und Fugro erfolgte über L-Band.

Die Referenzsysteme für die mit den PPP-Diensten gemessenen Koordinaten sind an den Empfängern einzustellen. Für RTX und Oceanix wurden die Koordinaten im internationalen Referenzsystem ITRF2014 aufgezeichnet und für die Auswertung nachträglich unter Verwendung der für 2022 veröffentlichten Transformationsparameter in den amtlichen Raumbezug (ETRS89/DREF91 Realisierung 2016) transformiert.

Am Schiffsempfänger wurden keine Konfigurationsänderungen vorgenommen. Für den Fugro-Dienst war das europäische Referenzsystem ETRS89 am Empfänger eingestellt. Als internationales Bezugssystem wäre an diesem Empfänger WGS84 auswählbar. Eine genaue Einstellung des Referenzrahmens war nicht möglich.

#### 4 Ergebnisse

Die Positionslösungen, welche während der Messkampagne mit den vier Positionierungsdiensten ermittelt wurden, sollen hinsichtlich Stabilität, Verfügbarkeit und Genauigkeit untersucht werden. Im Fokus stehen die Fragestellungen, ob in der Messkampagne die Dienste in den erwarteten Versorgungsgebieten genutzt werden konnten, eine stabile Positionslösung verfügbar war und

der prognostizierte Genauigkeitsbereich tatsächlich erreicht werden konnte.

Bei der Positionsbestimmung mittels GNSS wird zwischen Code-, Float- und Fix-Lösung unterschieden, mit denen unterschiedliche Genauigkeiten erreicht werden. Code-Lösungen erlauben eine Genauigkeit im Meterbereich. Eine genaue Koordinatenbestimmung im Zentimeterbereich ist nur mit Fix-Lösungen möglich. Sie setzen in Echtzeitanwendungen zwingend die Nutzung von Korrekturdaten entsprechender Positionierungsdienste voraus. Informationen zur Art der Positionslösung werden in der Regel zusammen mit den Koordinaten vom GNSS-Empfänger ausgegeben und können zur Beurteilung der Qualität herangezogen werden. Im Folgenden wird der Anteil der Messepochen mit einer Fix-Lösung zur Beurteilung der Stabilität der Positionslösung herangezogen. Als Versorgungsgebiet kann jener Fahrtbereich identifiziert werden, in welchem eine Fix-Lösung für den Großteil der Messepochen erreicht wurde. Das Vorliegen einer Code-Lösung bedeutet, dass der Positionierungsdienst zu dieser Messperiode nicht genutzt werden konnte.

Zur Beurteilung der Genauigkeit der mit den Echtzeit-Positionierungsdiensten bestimmten kinematischen Koordinatenlösungen werden Vergleichskordinaten benötigt. Hierfür wurden die aufgezeichneten Beobachtungsdaten der GNSS-Empfänger im Postprocessing nachträglich ausgewertet. In einem ersten Schritt der Analyse soll die hier genutzte Vergleichslösung auf ihre Eignung untersucht werden. Zur Bewertung werden mögliche systematische Abweichungen vom amtlichen Raumbezug sowie die Fehlercharakteristik der Lösung herangezogen (Abschnitt 4.1).

Für die Analyse der Echtzeitpositionslösungen und die Beurteilung der erreichten Genauigkeit wird anschließend für jede Messperiode die Differenz zwischen Echtzeit- und Vergleichslösung untersucht. Alle Lösungen werden zum Vergleich in den amtlichen Raumbezug (ETRS89/DREF91 Realisierung 2016) transformiert. Während der Messkampagne standen nicht zu jeder Zeit alle vier Dienste zur Verfügung. So führte die Fahrt zum Teil durch Abschnitte, welche außerhalb des Versorgungsbereiches bestimmter Dienste lagen. Weiterhin entstanden auch Datenlücken in den Korrektursignalen durch Abrisse der Übertragung. Damit ein direkter Vergleich der vier Positionierungsdienste möglich ist, werden daher in der Untersuchung zunächst nur jene Fahrtabschnitte verglichen, auf denen alle vier Dienste Fix-Lösungen lieferten. Diese Abschnitte erstrecken sich über Zeiträume von mehreren Stunden an unterschiedlichen Tagen und sind maßgeblich durch den Versorgungsbereich des Oceanix-Dienstes definiert. Um den Einfluss von groben Ausreißern auf die statistischen Parameter zu reduzieren, werden

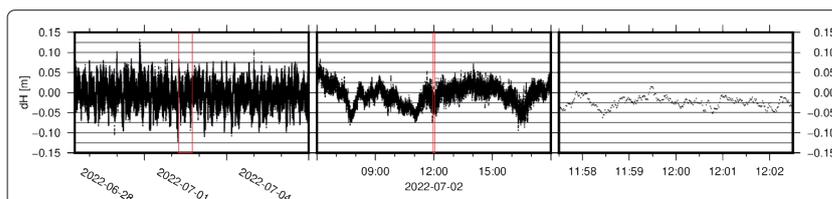
robuste Schätzer verwendet. Als Maß für die mittlere Abweichung wird der Median angegeben. Die Messunsicherheit wird mit Hilfe der mittleren absoluten Abweichung vom Median (MAD) berechnet. Um diese Größen mit den Herstellerangaben der 95%-Konfidenzintervalle zu vergleichen, wurde der MAD unter Annahme einer Normalverteilung skaliert, er entspricht somit der zweifachen Standardabweichung. In den weiteren Schritten soll dann bewertet werden, ob Unterschiede der Fehlercharakteristik in Abhängigkeit von der Entfernung zur Küste vorhanden sind. Außerdem kann für den RTX- und den Oceanix-Dienst das Konvergenzverhalten anhand je eines Fahrtabschnittes diskutiert werden.

#### 4.1 Validierung der GNSS-Vergleichslösung

Für die Auswertungen fiel die Wahl der Vergleichslösung auf den kinematischen Postprocessing-PPP-Dienst von Natural Resources Canada (CSRS-PPP), welcher sich bereits bei den Analysen vorangegangener Fahrten bewährt hatte. Zur Validierung dieser Positionslösung wurde eine kinematische Prozessierung von zwei GNSS-Referenzstationen des BKG auf der Insel Helgoland durchgeführt. Für beide Stationen erfolgte die Auswertung von Daten eines Javad TRE-3 Delta-Empfängers für den Zeitraum der Messkampagne von zehn Tagen mit CSRS-PPP im kinematischen Modus. Die Koordinaten des CSRS-PPP lagen zunächst im ITRF2014 vor und wurden nachträglich in den amtlichen Raumbezug (ETRS89/DREF91 Realisierung 2016) transformiert. Der Median der Koordinatenabweichungen von der Stationskoordinate im amtlichen Raumbezug ist zusammen mit der Messunsicherheit in [Tabelle 2](#) angegeben. An beiden Stationen fällt eine systematische Lageabweichung von 1 bis 2 cm in der Ost- und Nordkomponente auf. Systematische Unterschiede der Höhenkomponente in einer Größenordnung bis zu 1,5 cm sind vor dem Hintergrund des erhöhten Messrauschens statistisch nicht signifikant. Die Messunsicherheit der Höhenkomponente beträgt 5,0 cm, während die Lagekomponenten mit ca. 2 cm deutlich genauer bestimmt sind. Die Genauigkeit der Vergleichslösung ist damit in derselben Größenordnung wie die Genauigkeitsangaben zu den Positionierungsdiensten (siehe [Tabelle 1](#)) und begrenzt die Vali-

	HEL2	HELG
<b>Ostwert</b>	2,0 ± 1,4 cm	2,0 ± 1,4 cm
<b>Nordwert</b>	1,1 ± 2,0 cm	2,1 ± 1,6 cm
<b>Höhe</b>	-1,4 ± 5,0 cm	-0,3 ± 5,0 cm

**Tabelle 2:** Median und Unsicherheit (95 %) der Differenzen zwischen der kinematischen Postprocessing-Lösung mit CSRS-PPP und der amtlichen Koordinate der GREF-Stationen HEL2 (links) und HELG (rechts) auf der Insel Helgoland über den gesamten Kampagnenzeitraum



**Abb. 2:** Differenz der kinematischen Lösung zur Soll-Koordinate im amtlichen Raumbezug für den gesamten Zeitraum der Messkampagne (links, 10 Tage), für 12 Stunden (Mitte) und 5 Minuten (rechts) in der Höhenkomponente

dierungsmöglichkeiten auf diesen Genauigkeitsbereich.

[Abb. 2](#) zeigt die Differenz der kinematischen Lösung zur Soll-Koordinate im amtlichen Raumbezug für unterschiedliche Zeiträume in der Höhenkomponente. Man erkennt bei der Betrachtung über den gesamten Kampagnenzeitraum eine Unsicherheit in der Größenordnung von 5 cm. Einzelne Ausreißer erreichen eine Größe von bis ca. 10 cm. Beim Fokus auf kürzere Zeiträume wird deutlich, dass die Unsicherheiten maßgeblich durch systematische Abweichungen über Zeiträume von mehreren Minuten bis Stunden bestimmt werden und benachbarte Messepochen in dieser Koordinatenlösung nur geringfügige Unterschiede zueinander aufweisen. Hierin kommt die Autokorrelation der Fehlereinflüsse auf die Lösung zum Ausdruck.

#### 4.2 Verfügbarkeit und Stabilität der Positionslösungen

Die aufgezeichneten Daten für die Positionierungsdienste RTX, Oceanix und SAPOS enthalten als Qualitätsparameter Informationen zur Art der Positionslösung. Aufgrund der technischen Realisierung der Datenaufzeichnung lagen uns keine belastbaren Informationen zur Art der Positionslösung für den Fugro-Dienst vor. In [Tabelle 3](#) sind die Anteile an Fix-Epochen für RTX, Oceanix und SAPOS gegenübergestellt.

Der RTX-Dienst wurde erst während der Fahrt, am 29.06.2022 um 12:26 Uhr UTC, freigeschaltet und am Empfänger aktiviert. Zu diesem Zeitpunkt war die WEGA auf dem ersten längeren Fahrtabschnitt in Richtung »Entenschnabel« unterwegs. Von da an war der Dienst für die gesamte Messkampagne verfügbar. Der Anteil der Fix-Epochen liegt bei 96 %.

	Trimble RTX	Oceanix	SAPOS HEPS		
			50 km	50–100 km	>100 km
<b>Anteil der Fix-Epochen</b>	96 %	96 %	93 %	90 %	63 %

**Tabelle 3:** Anteil der Fix-Epochen. Der Wert bezieht sich auf das jeweilige Versorgungsgebiet (RTX: gesamte Messkampagne ab Aktivierung des Dienstes am 29.06.2022; Oceanix: bis 60 km von der Küste; SAPOS: deutsche AWZ, bei unterschiedlicher Entfernung von der Küste)

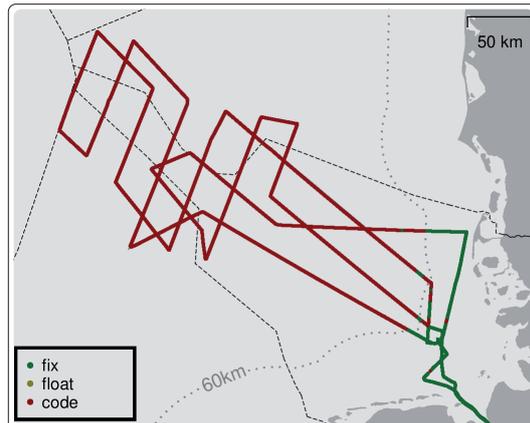


Abb. 3: Art der Positionslösung mit dem Oceanix-Dienst während der Messkampagne

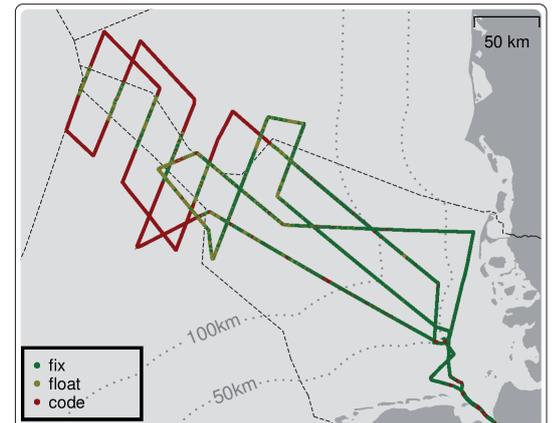


Abb. 4: Art der Positionslösung mit SAPOS während der Messkampagne

Wie erwartet deckt der Dienst die deutsche AWZ in der Nordsee vollständig ab. Das Versorgungsgebiet des Oceanix-Dienstes endet laut Aussage des Anbieters bei einer Entfernung von 60 km von der Küste. Dies bestätigte sich während der Messkampagne, da ab dieser Entfernung keine Fix-Lösung mehr möglich war (siehe Abb. 3). Innerhalb des küstennahen Bereiches liegt der Anteil an Fix-Epochen bei 96 %. Für SAPOS liegen keine Angaben zum Versorgungsbereich vor. Da SAPOS ein RTK-Dienst ist, muss von einer Abhängigkeit der Qualität und Stabilität relativ zum Abstand von der verwendeten Referenzstation ausgegangen werden. Abb. 4 zeigt die Art der Positionslösung während der Messkampagne mit SAPOS. Im Lösungsverhalten ist die erwartete Abhängigkeit von der Entfernung zur Küste erkennbar. Bis zu einer Entfernung von ca. 50 km sind nur vereinzelte Unterbrechungen der Fix-Lösung zu verzeichnen und der Anteil der Fix-Epochen liegt bei 93 %. Diese Entfernung entspricht dem üblichen Stationsabstand im SAPOS-Referenzstationsnetzwerk. Eine zusätzliche Ursache für Unterbrechungen in der Fix-Lösung mit SAPOS liegt in der Stabilität der Internetverbindung, da die VSAT-Verbindung bei bestimmten Fahrtrichtungen durch Schiffsaufbauten gestört war. Eine genaue Quantifizierung dieser Unterbrechungen erfolgte in diesem Experiment allerdings nicht. Zwischen 50 und 100 km Entfernung von der Küste traten vermehrt Float-Lösungen auf. Der Anteil der Fix-Epochen verändert sich nicht nennenswert und liegt immer noch bei 90 %. Bei einer Entfernung von mehr als 100 km wurde keine zuverlässige Lösung mehr erwartet. Dennoch hat der Empfänger in 63 % der Fälle Fix-Lösungen berechnet. In Abb. 4 erkennt man, dass auf diesen Fahrtabschnitten der Empfänger häufig zwischen Fix- und Float-Lösungen wechselt. Dies ist ein Anzeichen, dass trotz Fix-Lösung nicht die nominale Genauigkeit erreicht wurde. Außerhalb der deutschen AWZ war nahezu keine Fix-Lösung möglich. Offensichtlich unterstützt SAPOS hier keine Positionierung.

### 4.3 Vergleich der erreichten Genauigkeit in Küstennähe

Die weiteren Betrachtungen berücksichtigen das jeweilige Versorgungsgebiet der Dienste. Die Bewertung der SAPOS-Lösung erfolgt in Abhängigkeit von der Entfernung zur Küste. Es werden ausschließlich die Fahrtabschnitte innerhalb der deutschen AWZ genutzt.

Die Untersuchung der erreichten Genauigkeit erfolgt hier anhand der Differenz zwischen den Echtzeitleösungen und den Postprocessing-Koordinatenlösungen des CSRS-PPP-Dienstes (siehe Abschnitt 4.1). Um die Ergebnisse für alle Dienste vergleichen zu können, beschränkt sich die Analyse zunächst auf jene Fahrtabschnitte, in welchen RTX, Oceanix und SAPOS eine Fix-Lösung erreichten. Der Bereich ist maßgeblich durch das Versorgungsgebiet des Oceanix-Dienstes definiert (bis ca. 60 km Entfernung vom Festland, siehe Abb. 5). Der Fugro-Dienst wird in allen hier analysierten Messepochen berücksichtigt, auch wenn keine Informationen zur Art der Positionslösung vorliegen.

Die mittleren Abweichungen zwischen den Positionslösungen und der Vergleichslösung sind für diese Fahrtabschnitte in Tabelle 4 aufgeführt. Für alle vier Dienste betragen die mittleren Ab-

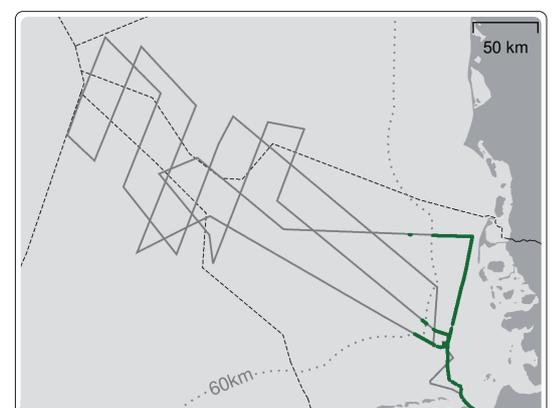


Abb. 5: Betrachtungsgebiet für küstennahen Genauigkeitsvergleich

	Trimble CenterPoint RTX Marine	NovAtel Oceanix	Fugro Marinestar	SAPOS HEPS
<b>Ostwert</b>	$-1,7 \pm 2,0$ cm	$-1,4 \pm 1,6$ cm	$-2,6 \pm 2,0$ cm	$-1,6 \pm 1,4$ cm
<b>Nordwert</b>	$-0,8 \pm 2,4$ cm	$-0,6 \pm 2,0$ cm	$-0,8 \pm 3,0$ cm	$-0,7 \pm 1,6$ cm
<b>Höhe</b>	$-0,3 \pm 6,2$ cm	$1,7 \pm 6,0$ cm	$0,5 \pm 7,4$ cm	$1,7 \pm 4,8$ cm

**Tab. 4:** Differenz zwischen den Positionslösungen der Dienste und der Postprocessing-Lösung ermittelt mit CSRS-PPP. Angegeben ist jeweils der Median zusammen mit der Messunsicherheit (95 %). Die Werte beziehen sich auf die in Abb. 5 dargestellten Fahrtabschnitte

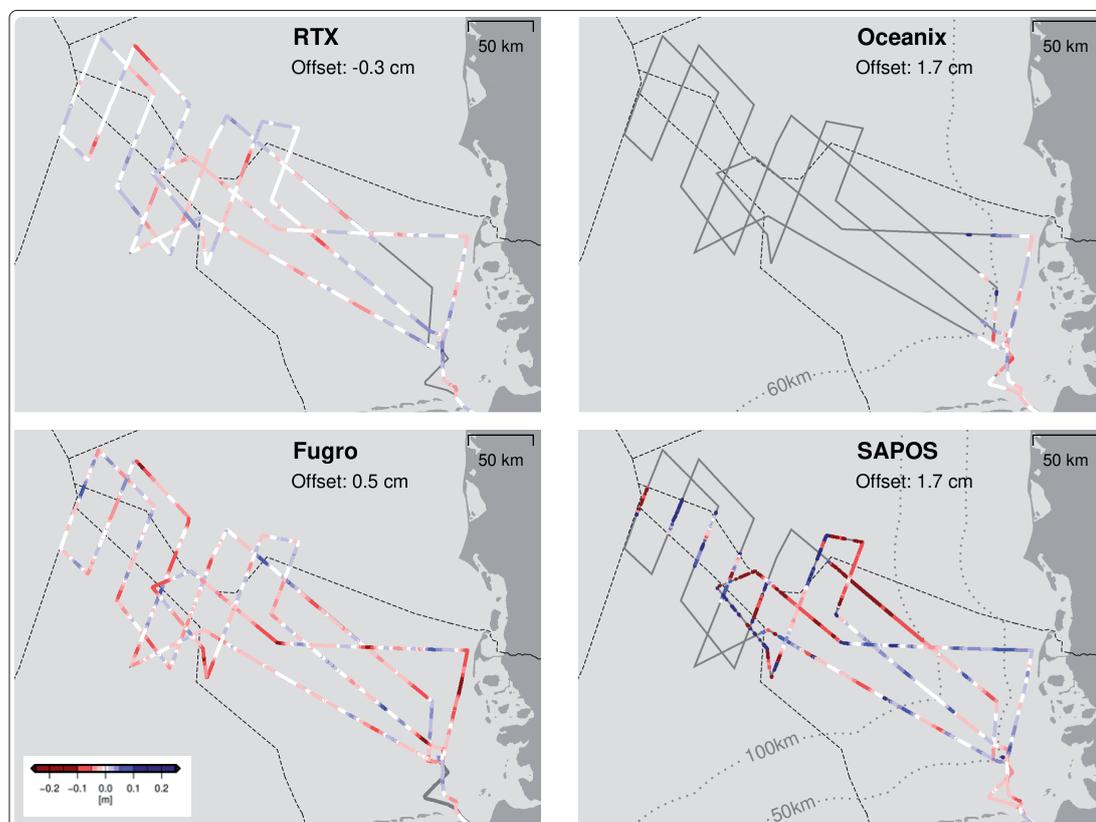
weichungen in den drei Koordinatenkomponenten wenige Zentimeter. Für die PPP-Dienste RTX, Oceanix und Fugro liegt die Messunsicherheit (95 %) bei 2 bis 3 cm in beiden Lagekomponenten und bei 6 bis 7,5 cm in der Höhenkomponente. Mit SAPOS wurden ca. 1,5 cm in beiden Lagekomponenten und 5 cm in der Höhenkomponente erreicht. Unter Berücksichtigung der Genauigkeit der Vergleichslösung stimmen die erzielten Genauigkeiten mit den Angaben der Betreiber überein (siehe Tabelle 1).

Die Unsicherheit ist für Fugro nur geringfügig größer als für die anderen Dienste. Dies deutet darauf hin, dass auch mit diesem Dienst für den Großteil der Messepochen Fix-Lösungen berechnet werden konnten.

#### 4.4 Diskussion der Genauigkeit während der gesamten Messkampagne

Abb. 6 stellt die Differenzen (abzüglich der mittleren Abweichung) zwischen den Positionslösungen

der Dienste und der Vergleichslösung (CSRS-PPP) in der Höhenkomponente dar. Ebenfalls wurde zur Reduzierung der Streuung benachbarter Messepochen ein gleitender Filter über 15-Minuten-Intervalle angebracht. Berücksichtigt sind für RTX, Oceanix und SAPOS ausschließlich Fix-Lösungen. Die Abb. 6 zeigt für SAPOS erneut den Zusammenhang zwischen Genauigkeit und Entfernung zur Küste. Die Abweichung von der Vergleichslösung kann auch für Fix-Epochen in den küstenfernen Fahrtabschnitten (>100 km) mehrere Dezimeter betragen, während in Küstennähe die Differenz in der Regel unter 5 cm liegt (vgl. Tabelle 4). Die Positionslösungen mit RTX und Fugro lassen keine solche Abhängigkeit erkennen. Dies bestätigt eine Betrachtung der küstenfernen Fahrtabschnitte. Tabelle 5 zeigt mittlere Abweichung und Unsicherheit der Differenz zwischen den Echtzeitleösungen und der Vergleichslösung für einen charakteristischen Abschnitt von 13 Stunden in maximaler Entfernung zum Festland (~350 km). Im



**Abb. 6:** Höhenabweichung der kinematischen Positionslösungen von der Vergleichslösung bestimmt mit CSRS-PPP. Dargestellt sind ausschließlich Fix-Lösungen, welche um den Offset (vgl. Tabelle 5) korrigiert wurden

	Trimble CenterPoint RTX Marine	Fugro Marinestar
<b>Ostwert</b>	$-1,6 \pm 1,6$ cm	$-2,3 \pm 2,4$ cm
<b>Nordwert</b>	$-0,8 \pm 2,0$ cm	$-0,4 \pm 3,4$ cm
<b>Höhe</b>	$-0,1 \pm 5,0$ cm	$0,1 \pm 8,6$ cm

**Tabelle 5:** Median und Messunsicherheit (95 %) der Differenz zwischen den Positionslösungen der Dienste und der Postprocessing-Lösung in den küstenfernsten Regionen des Untersuchungsgebietes

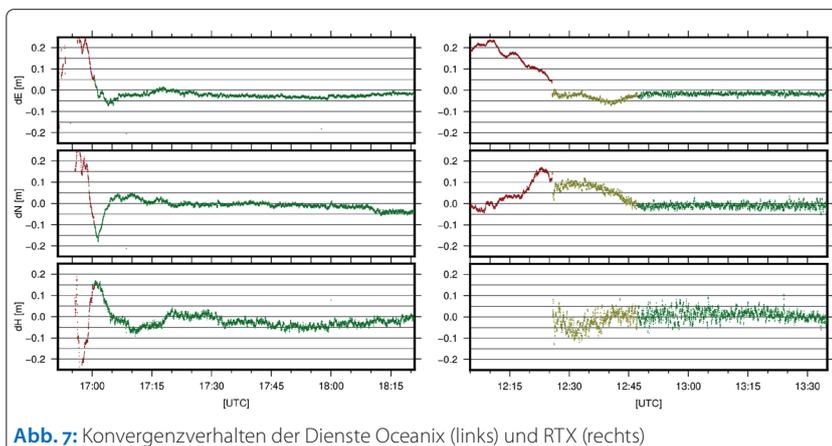
Vergleich zu den küstennahen Fahrtabschnitten (siehe [Tabelle 4](#)) liegen keine signifikanten Unterschiede in der Genauigkeit vor. Der Oceanix-Dienst war, wie diskutiert, nur bis 60 km Abstand von der Küste verfügbar.

#### 4.5 Konvergenzzeit

Neben der räumlichen Verfügbarkeit ist insbesondere bei Echtzeitanwendungen auch die Wartezeit zwischen Einschalten des jeweiligen Empfängers und Bereitstellung präziser Koordinaten entscheidend. Aus [Tabelle 1](#) ist abzulesen, dass sich hier die Spezifika der Dienste mit Angaben von 3 bis 35 min stark unterscheiden. Im Rahmen dieser Messkampagne konnte das Konvergenzverhalten für die Dienste RTX und Oceanix anhand von je einem Zeitabschnitt beobachtet werden. Es wurden keine dezidierten Versuche zur Ermittlung der erreichbaren Konvergenzzeit durchgeführt. Für den Fugro-Dienst erfolgte während der Fahrt keine Re-Initialisierung und bei SAPOS ist verfahrensbedingt kein Konvergenzverhalten beobachtbar.

Die Betrachtung des Einlaufverhaltens für den RTX-Dienst erfolgt anhand der ersten Initialisierung am 29.06.2022, um 12:26 Uhr UTC. Ab 12:48 Uhr UTC, also ca. 22 Minuten später, vermerkte der Empfänger, dass eine Fix-Lösung erreicht werden konnte. Ab diesem Zeitpunkt sind auch keine größeren systematischen Abweichungen zur Vergleichslösung mehr festzustellen (vgl. [Tabelle 4](#) und [Tabelle 5](#)). Somit betrug die Konvergenzzeit in diesem Falle ca. 22 Minuten, bis die nominale Genauigkeit erreicht wurde (siehe [Abb. 7](#)).

Durch einen Neustart des Leica-Empfängers, am 28.06.2022 um 16:50 Uhr UTC, konnte das



**Abb. 7:** Konvergenzverhalten der Dienste Oceanix (links) und RTX (rechts)

Einlaufverhalten mit dem Oceanix-Dienst beobachtet werden (siehe [Abb. 7](#)). Nach dem Wiedereinschalten vermerkte der Empfänger gegen 16:55 Uhr UTC den Beginn der Konvergenzzeit und ab 17:00 Uhr UTC, also ca. 5 Minuten später, gab der Empfänger an, eine Fix-Lösung erreicht zu haben. Die Differenz zur Vergleichslösung ist zu diesem Zeitpunkt jedoch noch größer als 10 cm. Nach weiteren 3 bis 5 Minuten reduziert diese sich auf weniger als 5 cm. Somit wurde in diesem Experiment die nominale Genauigkeit nach ca. 15 Minuten erreicht.

## 5 Zusammenfassung

Auch wenn die Messkampagne auf dem WWFS WEGA nicht primär der Validierung von Positionierungsdiensten diente, konnte eine Reihe von interessanten Ergebnissen und Erfahrungen gesammelt werden. Der Vergleich der hier verwendeten Positionierungsdienste Trimble CenterPoint RTX Marine (RTX), NovAtel Oceanix (Oceanix), Fugro Marinestar (Fugro) und SAPOS HEPS (SAPOS) erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Für diese Dienste wurden anwendungsspezifische Informationen wie ihre Versorgungsgebiete, die erreichbare Genauigkeit und Zuverlässigkeit sowie die Möglichkeiten zum Korrekturdatenempfang zusammengestellt.

Während der Dienst von NovAtel nur küstennahe Positionierung bis 60 km unterstützt, umfasst das Versorgungsgebiet der Dienste von Trimble und Fugro die deutsche AWZ vollständig. In dem jeweiligen Versorgungsgebiet waren die Dienste RTX und Oceanix mit einer Zuverlässigkeit von 96 % verfügbar. Mit SAPOS konnte küstennah eine vergleichbare Zuverlässigkeit erreicht werden. Erst ab einer Entfernung von ca. 100 km vom Festland lässt die Zuverlässigkeit bei der Nutzung von SAPOS erwartungsgemäß deutlich nach und die Genauigkeit der Fix-Lösung erreicht nicht mehr das übliche Zentimeterniveau.

Bei der Auswahl eines Positionierungsdienstes ist auf die Vergleichbarkeit der angegebenen Genauigkeitsmaße zu achten. Als Genauigkeitsangaben dient häufig die Standardabweichung (RMS) oder das 95%-Quantil. Letzteres entspricht im Falle einer Normalverteilung der doppelten Standardabweichung. Alle Dienste geben eine nominale Genauigkeit von besser als 5 cm in der Lage und 10 cm in der Höhe an (95%-Quantil).

Für einen unabhängigen Vergleich der vier Positionierungsdienste wurde die erreichte Genauigkeit anhand einer Vergleichslösung ermittelt, die mit Hilfe des Postprocessing-PPP-Dienstes von Natural Resources Canada (CSRS-PPP) berechnet wurde. Das Referenzsystem der Echtzeitpositionslösung ist bei der Nutzung eines PPP-Dienstes am Empfänger einstellbar. Um einen Koordinatenvergleich zu ermöglichen, wurden alle Lösungen

mittels der von der AdV bereitgestellten Transformationsparameter in den amtlichen Raumbezug (ETRS89/DREF91 Realisierung 2016) überführt. Im Rahmen der Genauigkeit der Vergleichslösung von ca. 3 cm horizontal und ca. 5 cm vertikal konnten die Genauigkeitsangaben der Dienstanbieter bestätigt werden. Die transformierten Positionslösungen waren in diesem Genauigkeitsbereich untereinander sowie mit der ermittelten Vergleichslösung konsistent. Erwartungsgemäß wur-

de mit SAPOS in Küstennähe eine etwas höhere Genauigkeit erreicht als mit den PPP-Diensten. Die Dienste RTX und Fugro zeigen innerhalb der AWZ keine Abhängigkeit ihrer Genauigkeit vom Küstenabstand.

Die durchgeführten Tests erlauben keine abschließende Beurteilung des Konvergenzverhaltens der Dienste. Im vorliegenden Fall konnte nach ca. 20 Minuten die nominale Genauigkeit erreicht werden. //

## Literatur

- AdV (2023): Transformationsparameter. [www.adv-online.de/Adv-Produkte/Integrierter-geodaetischer-Raumbezug/Transformationsparameter/](http://www.adv-online.de/Adv-Produkte/Integrierter-geodaetischer-Raumbezug/Transformationsparameter/)
- CSRS-PPP (2023): <https://webapp.csrscs-scrcs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>
- Fugro Marinestar (2023): [www.fugro.com/our-services/marine-asset-integrity/satellite-positioning/marinestar](http://www.fugro.com/our-services/marine-asset-integrity/satellite-positioning/marinestar)
- Jahn, Cord-Hinrich; Patrick Westfeld; Bernd Vahrenkamp et al. (2022): Development and Realisation of a Real-time High Positioning SSR-RTK Service for the North Sea Exclusive Economic Zone. *International Hydrographic Review*, DOI: 10.58440/ihr-28-a16
- Li, Xingxing; Jiaxin Huang; Xin Li et al. (2022): Review of PPP-RTK: achievements, challenges, and opportunities. *Satellite Navigation*, DOI: 10.1186/s43020-022-00089-9
- Liebsch, Gunter; Joachim Schwabe; Patrick Westfeld; Christoph Förste (2022): Improving the Geodetic Infrastructure for Bathymetry and 3D Navigation in the German Exclusive Economic Zone of the North and Baltic Sea. *International Hydrographic Review*, DOI: 10.58440/ihr-28-a17
- NovAtel Oceanix (2023): <https://novatel.com/products/gps-gnss-correction-services/oceanix-correction-services>
- Riecken, Jens; Paul Becker (2020): Ein neuer Satellitenpositionierungsdienst für Deutschland. *zfv*, DOI: 10.12902/zfv-0304-2020
- Riecken, Jens; Enrico Kurtenbach (2017): Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung – SAPOS. *zfv*, DOI: 10.12902/zfv-0180-2017

- Schirmer, Uwe; Joachim Schwabe et al. (2018): Modellierung des Quasigeoides GCG2016. In: Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, Arbeitskreis Raumbezug (Hrsg.): DHHN2016 – Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes und der einheitliche integrierte geodätische Raumbezug 2016, DOI: 10.5675/Raumbezug\_2016\_Hauptdokument
- Schwabe, Joachim; Jonas Ågren et al. (2020): The Baltic Sea Chart Datum 2000 (BSCD2000). Implementation of a common reference level in the Baltic Sea. *International Hydrographic Review*, [https://iho.int/uploads/user/pubs/ihrview\\_P1/IHR\\_May2020.pdf](https://iho.int/uploads/user/pubs/ihrview_P1/IHR_May2020.pdf)
- Trimble RTX (2023): <https://positioningservices.trimble.com/en/rtx>
- Weber, Georg; Denise Dettmering; Harald Gebhard; Rudy Kalafus (2005): Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip) – IP-Streaming for Real-Time GNSS Applications. 18th International Technical Meeting, ION GNSS-05, September 13-16, 2005, Long Beach, California, S. 2243–2247
- 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)
- Zentrale Stelle SAPOS (2023): <https://zentrale-stelle-sapos.de/news-produktinfos/2/>

## Danksagung

Die Arbeiten des BKG im Bereich der Ost- und Nordsee sind das Ergebnis einer langjährigen, konstruktiven Zusammenarbeit mit dem BSH. Wir danken dem BSH für die Bereitstellung der Schiffskapazitäten und die logistische Unterstützung. Unser besonderer Dank gilt der Besatzung des VWFS *WEGA* unter Leitung von Kapitän Michael Barth, die unsere Vermessungsarbeiten engagiert begleiteten und die maßgeblich zum Erfolg der Messungen beitrugen. Für die Durchführung der Messungen haben wir Demo-Lizenzen für die Dienste Trimble CenterPoint RTX Marine und NovAtel Oceanix genutzt, die uns freundlicherweise von den Firmen bereitgestellt wurden.

# Fugro Marinestar Precise Point Positioning status update

An article by HANS VISSER

Fugro Marinestar Precise Point Positioning (PPP) utilises a global network of 111 reference stations to provide centimetre-level positioning in real-time to maritime users. The system estimates precise orbit, clock and satellite phase bias corrections for GPS, Galileo, BeiDou and GLONASS satellites. Factors such as ionospheric activity, scintillations, troposphere and radio interference can affect positioning accuracy. Fugro Marinestar offers fast convergence time, multiple L-band tracking and supports various receivers.

Fugro Marinestar | GPS | Galileo | BeiDou | GLONASS | PPP | scintillation | L-band  
Fugro Marinestar | GPS | Galileo | BeiDou | GLONASS | PPP | Szintillation | L-Band

Fugro Marinestar Precise Point Positioning (PPP) nutzt ein globales Netzwerk von 111 Referenzstationen, um maritimen Nutzern eine zentimetergenaue Positionierung in Echtzeit zu ermöglichen. Das System schätzt präzise Bahn-, Takt- und Satellitenphasen-Korrekturen für GPS-, Galileo-, BeiDou- und GLONASS-Satelliten. Faktoren wie ionosphärische Aktivität, Szintillation, Troposphäre und Funkstörungen können die Positionierungsgenauigkeit beeinflussen. Fugro Marinestar bietet eine schnelle Konvergenzzeit, Mehrfach-L-Band-Tracking und unterstützt verschiedene Empfänger.

## Author

Hans Visser is a geodesist working in the Netherlands, monitoring the Fugro GNSS network.

[Hans.Visser@fugro.com](mailto:Hans.Visser@fugro.com)

## Introduction

Using Fugro's worldwide network of 111 GNSS reference stations, Fugro Marinestar estimates precise orbit and clock and satellite phase bias corrections for GPS, Galileo, BeiDou and GLONASS satellites (Fig. 1). These corrections are broadcast over geostationary satellites and via the Internet to maritime users to provide centimetre-level positioning in real-time.

## GPS

GPS typically has 31 satellites available. Currently, the USA are launching the third-generation satellites. The last launches are on the Falcon 9 rocket. Four GPS-III satellites are ready for launch. From 2026 GPS-IIIIF satellites will be launched.

## Galileo

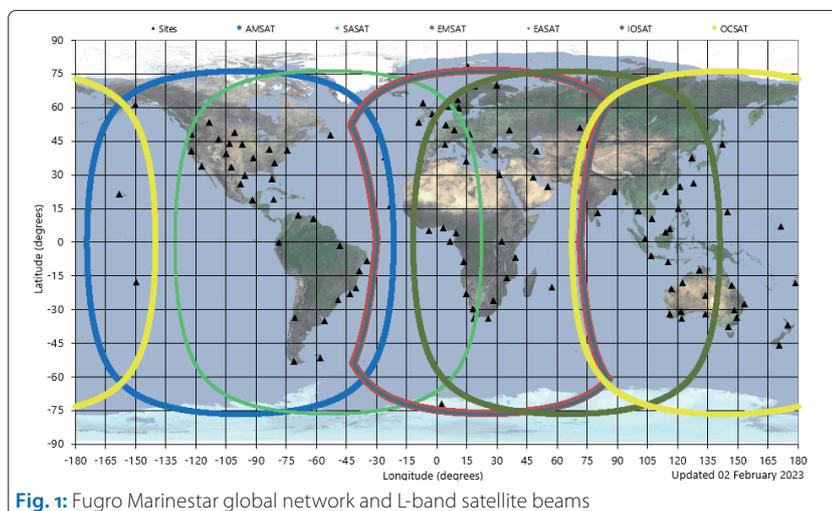
For the European Galileo system, there are 24 healthy satellites. Two (E14 and E18) are unhealthy in an elliptical orbit and E20 and E22 have been unhealthy for a long time. The launch of new Galileo satellites has been postponed till 2024 as Russian Soyuz rockets could no longer be used due to the Russian-Ukraine war. In May 2023, Galileo is still investigating new launch options. Ten new satellites have been built and are waiting to be launched in the coming years. Galileo has started designing the next-generation satellites.

## BeiDou

The Chinese BeiDou completed its third constellation in 2020. BeiDou has around 44 healthy satellites. BeiDou II uses satellites B1 to B19 from which there are typically 13 satellites available. C01 to C05 are geostationary (GEO). C06 to C09 and C38 to C40 have an inclined geostationary orbit (IGSO) over China and Australia. The advantage of IGSO satellites is they are high in the sky over China, which is good for inner cities. The high number of BeiDou satellites around the globe is of value during scintillation and local blockage of the sky as in harbours surveying close to large ships or in windfarming projects.

## GLONASS

The Russian GLONASS has around 20 satellites that are usable for Fugro Marinestar. It is now the weakest constellation in terms of the number of satellites. R06,



Constellation	Orbit height	Planes	Inclination	Repeat time for user	NSAT	Usable	Not useable
GPS	20,200 km	6	55°	11:58 / 1 day-4 minutes	32	31	22
Galileo	23,222 km	3	56°	14:20 / 14 days	28	24	1, 14, 18, 20, 22
BeiDou MEO	21,500 km	3	55°	26:30 / ~7 days	29	27	31
BeiDou GEO	35,800 km	3	0°	Stationary	8	5	57, 58, 61
BeiDou IGSO	38,300 km	2	55°	~1 day	11	10	
GLONASS	19,000 km		66°	11:15	24	20	6, 10, 23
Inmarsat L-band	35,800 km	1	0°	Stationary	6	6	

**Table 1:** Overview of GNSS constellations

R10 and R23 do not have L2. Normally, two satellites are launched together. In 2022, two satellites were launched on separate rockets. On average there are six to seven GLONASS satellites visible around the globe. There are moments during the day when only three GLONASS satellites are visible for a brief period. The GLONASS constellation is ageing.

## G4

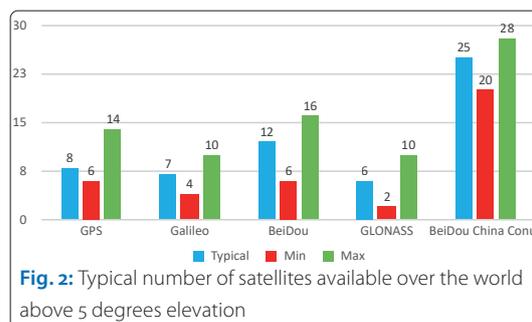
In total, there are for all four constellations (G4) around 120 satellites available (Table 1). For a user combining all constellations, there are typically 40 satellites usable with a minimum of 32 over the Americas and up to 55 in the Far East (Fig. 2).

## Reference stations

The 111 reference stations consist of NetR5 receivers, which track GPS and GLONASS, NetR9 which track GPS, Galileo, BeiDou, GLONASS and QZSS, and new generation PolaRx5 and Alloy receivers. Two independent receiver brands are used to assure that tracking of measurements continues in case of a firmware issue with one of the brands. The reference stations are hosted at Fugro offices, locations at Internet service providers and third party sites around the world. At the reference stations, an uninterruptable power supply (UPS) is used as a backup for sites with regular power outages, e.g., in South Africa. The antennas are placed with a clear view of the sky. This must be checked over time as new buildings can be built close by, and surrounding trees can grow over the years. Most sites are not affected by radio interference. Typically radio interference at the sites is short in the L1 band if GPS L1 jammers pass by cars. Interference can be constant for instance when, e.g., a nearby aviation radar or amateur radio is broadcasting a continuous signal. The data communication is to multiple network control centres over the Internet and 4G Cell phone communication.

## Coordinate datum

The coordinates of the reference stations are calculated using the International GNSS Service (IGS) and the Canadian CSRS (as independent comparison) in the International Terrestrial Reference Frame (ITRF) 2020 coordinate system. The precise



**Fig. 2:** Typical number of satellites available over the world above 5 degrees elevation

coordinates of all reference sites are updated with continental movement velocities. This gives coordinates in ITRF2020(Epoch Now). ITRF2020 and the previous ITRF2014 differ at the 3 to 4 mm level. To calculate the coordinates into the national datum a 14-parameter coordinate transformation from ITRF2020(Now) to, e.g., Europe ETRF1989 is needed. And then the local map projection to, e.g., for Germany Gauss-Kruger. These transformations are typically done by survey software.

## Orbits

At three orbit and clock centres, all GNSS measurements are processed in hourly orbits. These orbits are predicted for the next 24 hours. Orbit manoeuvres do happen. Mostly the satellites are first set unhealthy, but not always. Twice annually, satellites enter the earth's shadow for a few days and the solar panels start to rotate. This rotation can be modelled but the modelling is not always correct. Then the solution is to auto-disable the satellite for this period. The orbits for GPS and Galileo are the most accurate at the 3 cm level. BeiDou Medium Earth orbit satellites at 20,000 km height are 3 to 4 cm accurate. The BeiDou stationary and inclined geostationary satellites at 36,000 km are typically at sub-metre level. The GLONASS orbits are at the 5 to 10 cm level. The new GLONASS-K satellites R09, R11, R16 and R22 are smaller than the GLONASS-M satellites and hence the orbit is more difficult to estimate. The orbit errors are in the 10 to 20 cm range. The procedure is to exclude satellites with larger orbit errors from the broadcast.

## Clocks

After the orbits are calculated, a real-time clock filter estimates the clock offset of all satellites. Clocks

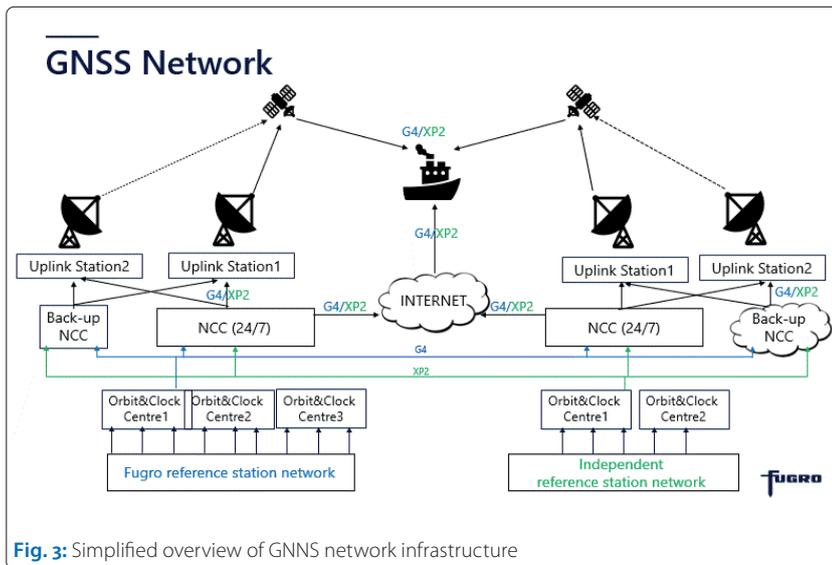


Fig. 3: Simplified overview of GNSS network infrastructure

can have sudden jumps. Some satellites, e.g., GPS SVN45(G21) have a daily cycle slip. GPS SVN43(G13) does have clock-jitter, which can last for 20 minutes and is in the 10 cm range. Field firmware does mitigate these effects.

### Satellite bias

The small fractional wavelength distance between the satellite antenna phase centre and the generator is estimated using the global network. This bias is also named Uncalibrated Phase Delay (UPD). The wide lane (L1–L2) ~86 cm and narrow lane (L1+L2) ~12 cm are used to fix the complete cycles for the user. When the correct number of cycles is fixed the solution reaches centimetre-level accuracy.

### Network Control Centres

At two Primary Network Control Centres, all data is collected and scheduled to be sent over satellites and the Internet. There are two active backup NCC, one physical and one in the cloud.

For L-band satellite beams dual satellite uplinks are available. In case of, e.g., severe weather, power outages or Internet problems at one uplink one can switch to another uplink location.

### L-band satellites for broadcast to vessels

The fourth generation Inmarsat satellites have an L-band as does the new Inmarsat 6 F1 launched in 2021 and the F2 launched in 2023. Inmarsat will continue to launch L-band capable satellites in the coming years. Having Ntrip (Networked Transport of RTCM (Real Time Correction Messages) via Internet Protocol) Internet as an alternative correction data delivery path is good to improve redundancy. In spring 2023, Fugro Marinestar upgraded two beams from 600 bits per second (bps) to match all the other beams at 1,200 bps. The higher update reduces the maximum age of satellite clock corrections and improves accuracy, as well as permitting addition of new services.

### Redundancy

To make sure customers always have solutions the whole network and all parts are duplicated to ensure redundancy. This is achieved by using six L-band satellites where three would be sufficient. Two NCCs with two independent backups. Independent operating systems and independent software and primary and backup uplinks (Fig. 3).

### Ionospheric activity

The sun has an 11-year cycle involving minimum and maximum active periods. The last solar minimum period lasted from 2017 to 2021, and now solar activity is increasing again towards a peak in 2024 to 2027 after which the solar activity will decrease again (see Fig. 4). The use of dual frequencies reduces the effect of the ionosphere to 1 % of its size. This means the coming years PPP (precise point positioning) may become slightly less accurate in areas around the equator and during geomagnetic storms.

### Scintillations

Scintillations start with movement of ions in the layer between 100 and 1,000 km above the earth's surface, occurring after sunset in the equatorial zone. During the day, the ionosphere gets ionised and after sunset, there is a transport of ions to neutralise the ionosphere. This horizontal movement

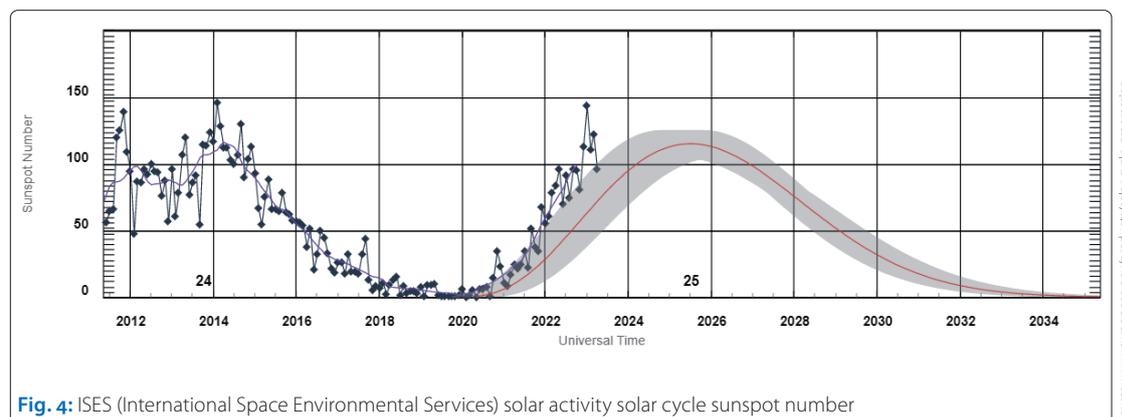


Fig. 4: ISES (International Space Environmental Services) solar activity solar cycle sunspot number

of ions interferes with the GNSS signals of L-band frequencies. This causes fast alternate fading and amplification of the signal strength. The stronger Alt-BOC signals of Galileo and GPSIII can track better, but also these signals are affected. Scintillation is more severe two to three days after a coronal mass ejection (CME) of the sun. If the CME is directed towards the earth the scintillation can last for several days.

The effect is most severe in South America where the geomagnetic field is weaker. The effect of scintillation is seen globally around the equator in Africa, India, Indonesia, the Philippines and the Pacific (see Fig. 5). To reduce the effects of scintillation, use an elevation mask of 5 degrees and have as many satellites available as possible. From the user's perspective, scintillation is an invisible »cloud« blocking a part of the sky. If at least six to seven satellites from different constellations are visible from an uninterrupted area it is possible to prevent a restart of the position. During scintillation, the position noise can increase from centimetre level to decimetre level due to phase noise. Robust de-weighting of phase measurements minimises the effect of scintillation. Marinestar has a paid scintillation prediction service.

In polar regions, scintillation is typically much shorter, but the number of tracked satellites can reduce fast.

## Troposphere

During heavy tropical rain, PPP positions can degrade, e.g., on the west side the signals are extra delayed by the rain. The passing rain front typically shows an increase in height as the signals are delayed by the raindrops. At mid-latitudes, the effect of the troposphere is normally within the system noise.

## Phase multipath

Metal objects in the near field of the GNSS antenna can degrade the performance. This is a challenge on board ships, where in the masts there are many antennas. Preferably the antenna is on a one-metre pole free from metal objects.

## Radio interference

Radio interference is a major problem in 1 % of the surveys. If it does affect the receiver, the user does have a real problem. On ships, the main source of radio interference is Iridium and Globalstar at 1,616 to 1,625 MHz. Narrow bandwidth filtering of the antenna can resolve this. In general, self-interference of badly designed GNSS antennas is another source of interference as are receiver antenna connectors which are not well terminated. Further is amateur radio in the 1,240 to 1,300 MHz a problem for GLO-NASS L2, BeiDou B3 band and Galileo E6. Any piece of electronic equipment, e.g., computers, Wi-Fi

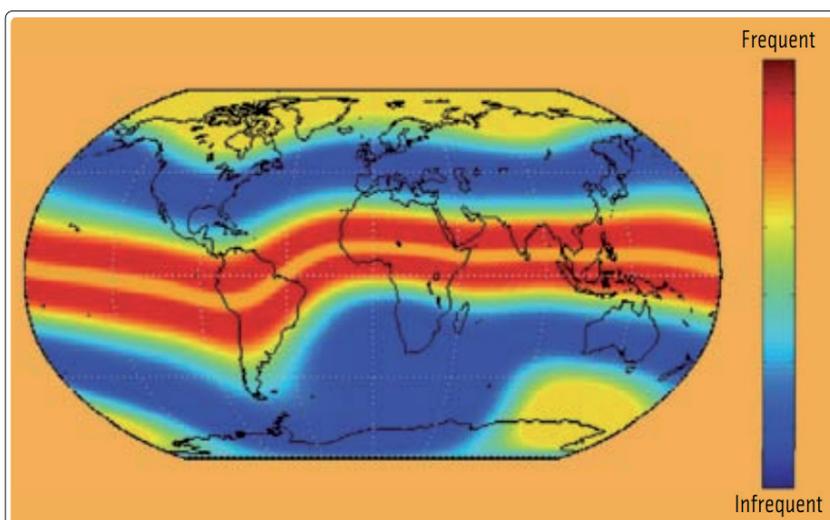


Fig. 5: Scintillation map showing a frequency of disturbances at solar maximum

Source: www.insidegnss.com/auto/julyaug09-kintner.pdf

routers can be the cause of radio interference. Also, GPS jammers on land are a source of interference as are military activities near Russia, Syria, Israel and Egypt. Using narrowband filters in antennas, wide-band interference rejection and using notch filters can help to mitigate interference. Built-in spectrometers can help to identify the type of interference, but finding a source require skilled personnel.

## Antenna cable length

GNSS signal strength reduces in a cable. Customers should make sure sufficient signal arrives in the receiver. Low-loss cables can help here. Use of N- or TNC adapters should be avoided if possible. Amplifiers can keep the signal within the required range of 33 to 50 dB (receiver dependent values).

## Maximum age of corrections

With the GPSII and GPSIII satellites, the excellent-quality Galileo clocks and the BeiDou clocks it is possible to extend the age of corrections by changing the receiver settings. In the early days of DGPS (Differential Global Positioning System), the max-age was 10 seconds later followed by PPP to 60 and 300 seconds. A threshold of 900 seconds can now be used (see Fig. 6).

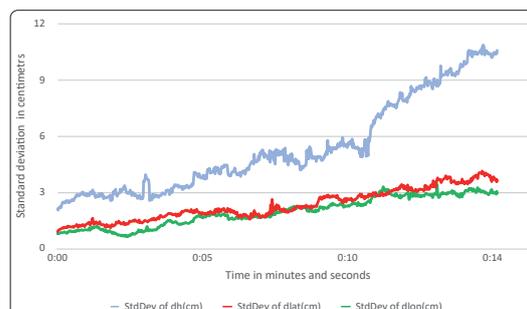


Fig. 6: Position accuracy versus age of corrections.

One hour corrections followed by 15 minutes without corrections. 35 samples (Netherlands 2022)

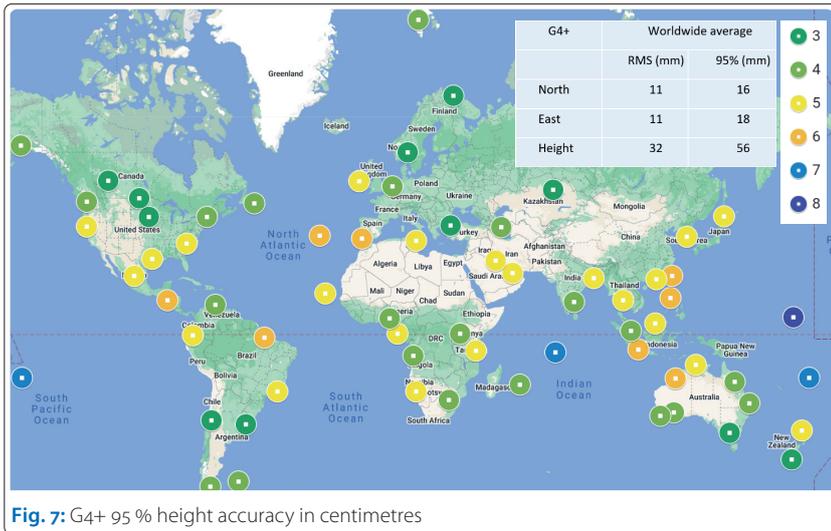


Fig. 7: G4+ 95 % height accuracy in centimetres

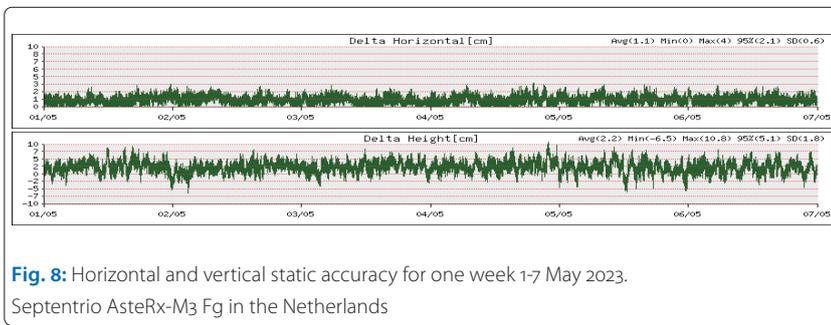


Fig. 8: Horizontal and vertical static accuracy for one week 1-7 May 2023. Septentrio AsteRx-M3 Fg in the Netherlands

### Fugro Marinestar accuracy

Using around 90 G4 reference stations the G4+ accuracy is measured in 2023 from 1 January to 8 May (see Fig. 7). Only sites with 99 % availability and no resets are used (see the example from the Netherlands in Fig. 8).

### Convergence time

By using UPDs (uncalibrated phase delays) from GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou the convergence time has improved from 20 minutes to 6 to 8 minutes. See Fig. 9 where the results of 27 receivers around the world are plotted. The time to reach 10 cm accuracy North, East is 7 minutes. For the height this is 11 minutes in 95 % of the cases.

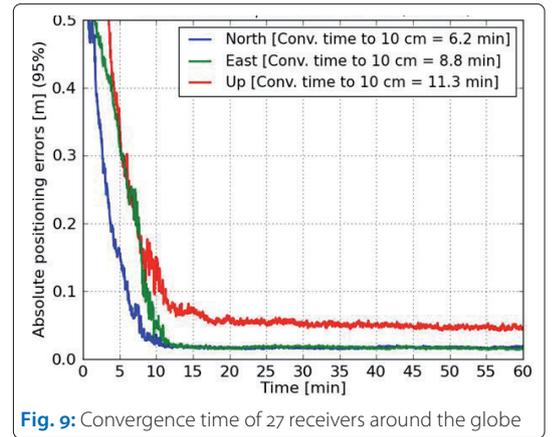


Fig. 9: Convergence time of 27 receivers around the globe

### Field receivers

Fugro Marinestar-capable receivers are available from Applanix, Kongsberg, SBG, Septentrio, Trimble and OEM (original equipment manufacturer) board from application manufacturers such as Norbit, R2Sonic and others.

### Multiple L-band

Modern receivers do support tracking of multiple L-band correction signals in parallel, up to three beams per antenna. With two separate L-band antennas the likelihood that the L-band signal is blocked or disturbed by scintillation becomes very low (see Fig. 10). Especially as Ntrip over (satellite) Internet (VSAT, Starlink, Iridium, cell phone) is also available.

### Fast position update rate

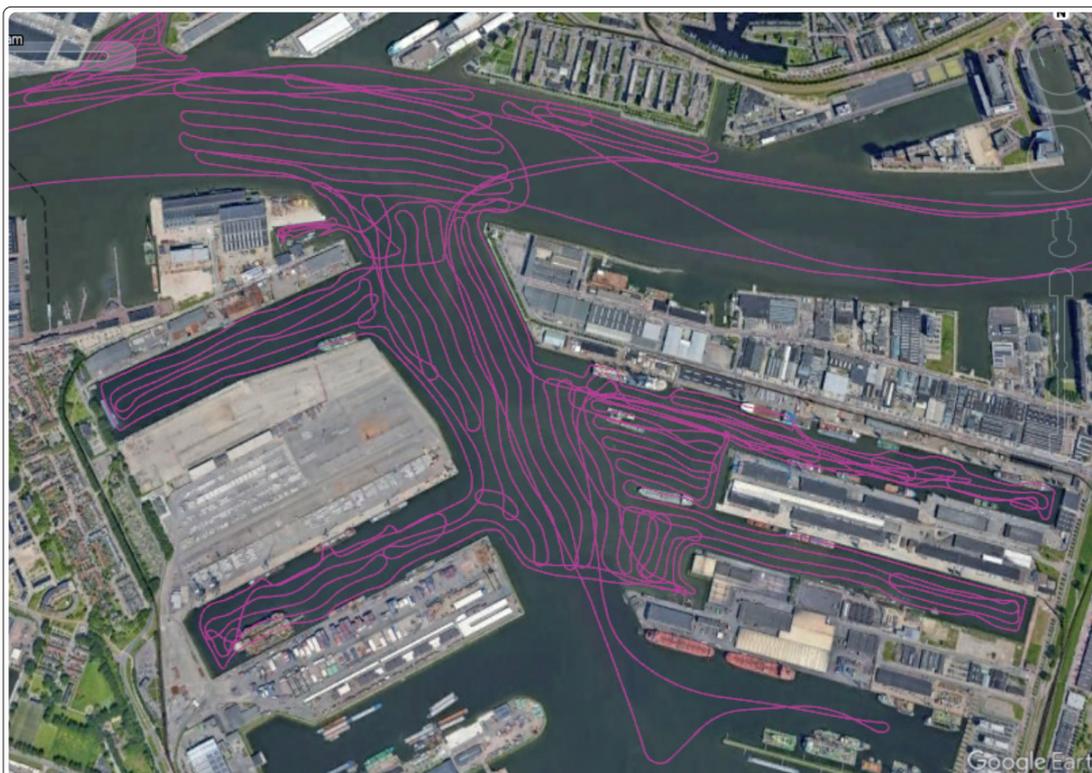
Typically positioning has been ten times per second (10 Hz) for multibeam use. Now the update rates are going up to 20 Hz. 20 Hz has value for fast-moving survey vessels. For the many satellites tracked and used and the higher update rates, more computer power is needed within the receiver and more clever algorithms.

### RTK versus PPP

The PPP positions come close to the accuracy of RTK (real-time kinematic) after convergence. When the RTK baselines get larger than 5 to 10 km both

L-Band Tracker Status							
	Beam 1	Beam 2	Beam 3	Beam 4	Beam 5	Beam 6	Beam 7
Beam Name	EMSAT	SASAT	IOSAT	EMSAT	SASAT	IOSAT	NTRIP
Frequency	1545.9275 MHz	1545.8150 MHz	1545.8075 MHz	1545.9275 MHz	1545.8150 MHz	1545.8075 MHz	N/A
Baudrate	1200 Baud	N/A					
Service ID	0xC685	0xC685	0xC685	0xC685	0xC685	0xC685	LBAS2
Freq. Offset	1886.529 Hz	1643.160 Hz	1535.453 Hz	1886.836 Hz	1643.510 Hz	1534.936 Hz	N/A
C/N0	43.10 dB-Hz	43.50 dB-Hz	38.40 dB-Hz	43.50 dB-Hz	44.60 dB-Hz	34.50 dB-Hz	N/A
AGC Gain	26 dB	26 dB	26 dB	43 dB	43 dB	43 dB	N/A
Status	Locked	Locked	Locked	Locked	Locked	Locked	Locked
Source/Tracker	LBR board	LBR board	LBR board	Internal	Internal	Internal	NTRIP
Lock Time	>18h12m15s	5h22m12s	>18h12m15s	>18h12m15s	5h48m28s	14h37m28s	>18h12m15s

Fig. 10: Example of Septentrio U3 Marine with up to seven parallel L-band channels using two separated antennas



**Fig. 11:** Hydrographic survey in the Port of Rotterdam (Waalhaven) with Septentrio M3+ Fugro Marinestar data.

With support of Willem Snoek

solutions have the same level of accuracy. RTK has the advantage of an accurate position within one minute. PPP has the advantage of global availability.

## Applications

Fugro Marinestar PPP positioning is used in dredging, hydrography, oceanographic research, wind farming, site monitoring, cable and pipe laying and piling activities.

In Fig. 11, a hydrographic survey in the harbour of Rotterdam is shown which was conducted in May 2023 with seven days of good data.

## Conclusion

In 2023, there are around 120 satellites allowing tracking of up to 50 satellites giving centimetre-level accuracy converging in 10 minutes towards 10 cm. Still, all GNSS satellites are of value to make positioning more accurate and robust. //

## References

Fugro Marinestar: [www.marinestar.com](http://www.marinestar.com)

Number of satellites:

<https://gnss-monitoring.dlr.de/gnss-advanced/map>

ITRF2020: <https://itrf.ign.fr/en/solutions/ITRF2020>

Global Scintillation map:

<http://www.insidegnss.com/auto/julyaug09-kintner.pdf>

Inmarsat future: <https://www.inmarsat.com/en/about/technology/our-roadmap.html>

Global interference monitoring: <https://gpsjam.org>

GNSS monitoring from Finland:

<https://gnss-finland.nls.fi/#/satellites>

Global GNSS monitoring: <https://galmon.eu>

GPS: [https://www.navcen.uscg.gov/gps-constellation?order=field\\_gps\\_prn&sort=asc](https://www.navcen.uscg.gov/gps-constellation?order=field_gps_prn&sort=asc)

Galileo: <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>

BeiDou: <http://www.csno-tarc.cn/en/system/health>

GLONASS: [https://glonass-iac.ru/glonass/day\\_monitoring](https://glonass-iac.ru/glonass/day_monitoring)

# GNSS für die 3D-Positionierung auf See

Ein Beitrag von FRANK HINSCHKE

Der Artikel liefert einen Überblick über aktuelle GNSS-Technologien, die für die zentimetergenaue Positionsbestimmung auf See verwendet werden. Genauer betrachtet werden die Netzwerk-RTK-Lösung und das Precise Point Positioning. Erklärt wird, wie die Korrekturdaten in Echtzeit auf das Schiff übertragen werden.

GNSS | GPS | GLONASS | BeiDou | Galileo | DGNSS | Korrekturdaten | Netzwerk-RTK | PPP  
GNSS | GPS | GLONASS | BeiDou | Galileo | DGNSS | correction data | network RTK | PPP

The article provides an overview of current GNSS technologies used for centimetre-precise positioning at sea. It takes a closer look at the network RTK solution and Precise Point Positioning. It explains how the correction data is transmitted to the ship in real time.

## Autor

Frank Hinsche ist Service und Support Specialist in Berlin bei der Leica Geosystems GmbH mit Sitz in München.

[frank.hinsche@leica-geosystems.com](mailto:frank.hinsche@leica-geosystems.com)

## Vorbemerkung

Schon unsere Vorväter sahen, dass eine genaue Positionierung – damals noch 2D – ganz entscheidend von dem Problem der Entfernung abhing. Anders ausgedrückt, sie sahen, dass die Lösung dieses Entfernungsproblems auch das Problem der exakten Ortsbestimmung lösen würde. Damals ging es allerdings um die akustische Reichweite, nämlich darum, die Mittagskanone zu hören, um die Uhrzeit zu bestimmen. Die Geschichte hat uns in der Folge gezeigt, dass mit einer genauen Uhr – oder einer Uhr mit einer genauen Zeitdifferenz – viel gewonnen werden kann.

Warum jetzt dieser Rückblick?

Auch wenn man heute die Problematik der Ortsbestimmung mit aktuellen und neuen Verfahren betreibt, spielt immer wieder die Messung der Zeitdifferenz eine Rolle, nur eben in anderen Größenordnungen als früher. Heute beschäftigen uns die Laufzeit des Satellitensignals zur Erde, die Zeitdifferenz zwischen Satellitenuhr und Empfängeruhr, die Zeitfehler der Satellitenuhr über die Nutzungszeit sowie die Zeitfehler durch relativistische Effekte. Und doch bleibt auch das Problem der Entfernung bestehen. Denn von ihr hängt die Genauigkeit und die differenzielle Positionierung ab.

## GPS und GNSS

Springen wir in das 20. Jahrhundert. Die Chancen, die damals GPS bot, hat man schnell erkannt und genutzt. Aus GPS wurde in den letzten Jahren GNSS, weil eben nicht nur das amerikanische NAVSTAR-GPS-System mit aktuellen Empfängern genutzt werden kann, sondern alle vier globalen Systeme – neben GPS sind dies auch GLONASS, BeiDou und Galileo. Aktuelle Empfängergenerationen verwenden alle Satellitensysteme und nut-

zen in Kombination alle Signale, die gemeinsam ausgewertet werden, sodass eine Position in 3D bestimmt werden kann. Die Vorteile von GNSS – das globale einheitliche Koordinatensystem, die Möglichkeit, rund um die Uhr messen zu können – gelten weiterhin, auch wenn man vielleicht, was die Koordinatensysteme der vier Satellitensysteme angeht, geodätische »Tricks« der Transformation anwenden muss. Es gilt weiterhin: GPS/GNSS bietet viele Vorteile, da es global 24 Stunden verfügbar ist, und somit jederzeit eine 3D-Position in einem einheitlichen globalen Koordinatensystem bestimmt werden kann. Das ist aber mittlerweile nur die halbe Wahrheit. Warum? Allein ist diese Position nur auf den Meter genau. Um genauer zu werden, braucht man Korrekturdaten von einer festen Referenzstation.

## Echtzeitkorrekturen

Wenn wir heute von GNSS sprechen, meinen wir genauer gesagt differenzielles GNSS (DGNSS), also die Kombination aus dem eigenen GNSS-Signal in Verbindung mit Korrekturdaten, die man von einem Provider erhält, als Ersatz für die eigene Referenzstation. Mit diesen Korrekturen werden mit bestimmten Algorithmen die Phasenmehrdeutigkeiten aufgelöst oder fixiert und es wird eine RTK-Lösung bestimmt. Das Ergebnis ist dann eine exakte geodätische 3D-Position mit einer Genauigkeit bis zu einem Zentimeter.

Hier werden zwei Dinge deutlich: Zum einen hat jeder Empfänger eigene Berechnungswege, die zur Lösung führen. Zum anderen müssen die Korrekturdaten zum Rover kommen. Unter Umständen kommt noch ein dritter Aspekt hinzu: Kann jeder Empfänger jedes Korrekturdatenformat verstehen?

Fangen wir mit den Korrekturdaten an. Aktuell werden Korrekturdaten zu allen vier globalen Satellitensystemen im standardisierten RTCM-Format 3.x von Providern ausgesandt. Wie aber bei jedem Standardformat ist der Prozess ein langer Weg und behindert eine schnelle Anpassung an das technisch Mögliche. Es gibt also kleine Differenzen in der Interpretation, die aber tatsächlich durch Interoperabilitätstests der großen namhaften Hersteller minimiert werden, sodass eine Messung möglich ist. In Deutschland kann man mit jedem Empfänger jeden Provider nutzen und man erhält eine Zentimeterlösung.

Wie schaut es nun mit den Algorithmen aus? Auch hier ist der Stand der Technik so weit, dass mit den RTCM-Korrekturdaten ein Arbeiten möglich ist. Die Unterschiede hängen eher davon ab, wie mit den Daten in kinematischen Anwendungen umgegangen wird. Ebenso hängt es vom Fokus des Herstellers ab, in welchem Maße dieser die Zuverlässigkeit oder Initialisierungsgeschwindigkeit priorisiert.

Das große Problem, speziell bei der Verwendung auf See, ist der Weg. Wie kommen die Korrekturdaten von den Referenzstationen an Land zu dem Empfänger auf dem Schiff?

### Weg der Korrekturdaten

Korrekturdaten werden heute entweder über Funk oder über mobiles Internet versendet. Der einfachste Weg ist sicher die Übertragung per Funk. Referenzstation und Schiff besitzen je ein Funkgerät. Diese Funkgeräte arbeiten auf derselben Frequenz, sodass die Korrekturdaten empfangen werden und im Empfänger verarbeitet werden können. Dies kann jedoch nur funktionieren, wenn der Funkempfang gegeben ist, was von der Leistung des Funkradios (Sender) abhängig ist. Hier ist also ein physikalisches Moment (Leistung und Ausbreitungsweg und die Erdkrümmung) und ein rechtlicher Aspekt (erlaubte Leistung) zu betrachten. Bleibt also mobiles Internet. Hier ist die Reichweite nahezu unbegrenzt, wenn sie nicht an den Funkmasten der Mobilfunk-Provider hängen würde und die Funkmasten auf See nicht irgendwann fehlen würden. Es gibt also auch hier de facto ein Entfernungsproblem.

### Genauigkeit

Die Genauigkeit wird in der Regel an der Basislinienlänge zwischen Referenzstation (an Land) und Rover (auf dem Schiff) festgemacht. Bei heutigen Echtzeitvermessungen kommen allerdings Korrekturdaten zum Einsatz, die einer Vernetzungslösung zugrundeliegen. Diese Daten werden mathematisch so behandelt, dass der GNSS-Fehlerhaushalt besser bestimmt wird, als dies ein Rover in der Einzellösung kann. Das Ganze hat den Vorteil, dass diese Netzwerklösung eine Homogenisierung der

Genauigkeit im gesamten Netz berechnet. Hier haben wir aber wieder das geometrische Problem, da die Referenzstationen alle an der Küste sind und somit die Netzmaschen eine natürliche Grenze bilden. Man spricht deswegen jetzt von einer Netzwerk-RTK-Lösung (NRTK-Lösung). Die Übermittlung der Daten ist durch die Nutzung des mobilen Internets möglich, aber wieder hat man das Problem der Infrastruktur – und damit ein Reichweitenproblem. Es müssen also andere Wege gefunden werden. Ein möglicher Weg wäre die Berechnung entfernungsunabhängiger Lösungen, die dazu noch die klassische Übertragung der Korrekturdaten nicht nutzen würde.

### Precise Point Positioning (PPP)

Das PPP-Verfahren wird schon länger untersucht. Bei PPP wird der GNSS-eigene Fehlerhaushalt geschätzt und nicht durch die Verknüpfung mit anderen GNSS-Daten aus einem Netzwerk für den eigenen Rover berechnet. Da bei allen RTK-Verfahren der Rover zur Fixierung der Daten eine Referenzstation benötigt, muss dieses »Datenvolumen« zum Rover gebracht werden, denn dieser führt die eigentliche Berechnung für das letzte Stück der Basislinie durch. Bei PPP-Verfahren ist diese Datenmenge deutlich geringer, da sich nicht alle Korrekturen sekundlich ändern. Vielmehr reicht es, Korrekturen, die zum Beispiel den Satellitenorbit, die Ionosphäre und Troposphäre betreffen, längerperiodisch an den Rover zu übermitteln. Allerdings müssen diese Korrekturen auch erst einmal berechnet werden, um sie dann zu übertragen. Natürlich muss dies auch für alle verwendeten GNSS-Systeme geschehen. Der verwendete GNSS-Rover benötigt dazu ebenfalls einen Echtzeitalgorithmus, der die PPP-Daten verarbeiten kann, um eine zentimetergenaue Lösung zu berechnen. Die Korrekturen werden hierbei auch aus einem klassischen, terrestrischen GNSS-Referenznetzwerk gewonnen, nur bereitet in diesem Fall die Software, die die Daten der Referenzstationen auswertet, die PPP-Korrekturen auf. Damit die Daten zu einer Initiierung des Rovers führen, benötigt man eine sogenannte Initialisierungszeit, die bis vor Kurzem noch bei circa 15 Minuten oder mehr lag. Mittlerweile ist diese Zeit auf rund drei Minuten Erstinitialisierung reduziert worden. Das heißt, dass man danach im Prinzip ein Echtzeitsystem auf PPP-Korrekturen hat. Diese so ermittelten Korrekturen sind abhängig von der Größe des Referenznetzwerks. Ist dieses ein lokales, sind die Korrekturen auch in etwa an diese Größe gebunden; und wird das Netzwerk verlassen, wird eventuell extrapoliert. Handelt es sich um ein globales Netzwerk, wie etwa bei VERIPOS, können Korrekturen global bestimmt und angewendet werden.

Gerade in der aktuellen Zeit werden diese Daten immer wichtiger. Denken wir an das Offshore-Ge-

schäft, welches immer relevanter wird. Man denke an die Windparks, die außerhalb der Küstenzone liegen. Diese Bauarbeiten benötigen zentimetergenaue Positionen, die mit Hilfe von GNSS geliefert werden. Dieser Bedarf muss bedient werden. Früher wurden eigene Referenzstationen in den Parks installiert, die durch eine Bestimmung im Postprocessing an das Festlandnetz angebunden wurden. Damals musste Fachpersonal beauftragt werden, um diese lokalen Referenzen zu bestimmen. Aber auch dieser Weg hatte das Reichweitenproblem, wegen der Länge der Basislinie. Somit sind wir wieder bei der Übertragung von PPP-Daten, die bestimmt, in einem globalen Netz an einen GNSS-Empfänger, der diese Daten empfängt und mit seiner Algorithmik präzise Positionen berechnet, übertragen werden müssen. So ist eben auch das Bohren von Fundamenten weit vor der Küste mit den normalen GNSS-Empfängern möglich. PPP ist überall möglich, egal ob Nordsee oder Atlantik oder sonst wo auf der Welt.

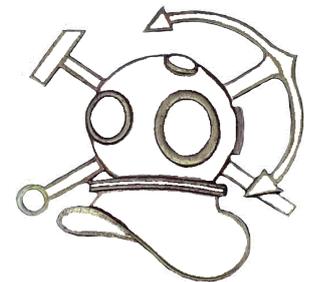
#### Datenübertragung zum Schiff

Bleibt also noch die letzte Frage offen, wie kommen die Daten aufs Schiff?

Die bereitgestellten Daten können auch über den herkömmlichen Weg, also mobiles Internet, abgerufen werden. Dazu bietet sich das Ntrip-Protokoll an, wie bei normalen NRTK-Daten. Was aber, wenn man sich außerhalb der Reichweite von Mobilfunk aufhält? Dann kann eigentlich nur noch der Satellit helfen. Die globalen Dienstleister nutzen dafür Kommunikationssatelliten. Die berechneten Korrekturdaten werden zum Uplink auf globalen Kommunikationssatelliten bereitgestellt. Da sie deutlich komprimierter sind als normale RTCM-Daten kann der Versand über diesen Weg auch in einem wirtschaftlichen Kostenrahmen und mit entsprechender Güte erfolgen. Über das L-Band erfolgt dann der Downlink über die GNSS-Antenne zum Empfänger, der dann die GNSS-Daten von den Korrekturen trennt und sie im RTK-Algorithmus wieder zusammenführt. Als Ergebnis erhält der Nutzer wie gewohnt eine zentimetergenaue Position. Damit sein Bauwerk dann genau dort errichtet wird, wo es geplant wurde.

Was für den Bau gilt, kann der Peilung nur Recht sein. Über das beschriebene Verfahren können auch kinematische Bewegungen korrigiert und es

**Fa Niederkofler**  
**ROV – Operateur. Sonaruntersuchung**  
**Forschungs- Ingenieur- Berufstaucharbeiten**  
**Bachweg 10**  
**A – 6091 Götzens**  
[rovdienst@gmail.com](mailto:rovdienst@gmail.com)  
**+43 670 7751755**  
**VAT.: ATU70034278**



**Ihr Fachkundiger Tauchbetrieb im Alpenland.**

können zu jeder Zeit kinematisch präzise GNSS-Koordinaten geliefert werden. Ganz so wie man es von Standard-DGNSS gewohnt ist. Das Messen ist nicht nur offshore möglich, sondern auch im Landesinneren, wo es keine Referenznetze gibt. Zum Beispiel ist dies mit Empfängern der aktuellen Generation von Leica Geosystems möglich. Den größeren Nutzen zieht die Vermessungs- oder Peilmannschaft, wenn sie im Landesinneren in eine Mobilfunklücke hineinfährt, aus dem HxGN SmartNet Global Service. Mit dem sogenannten Bridging kann die präzise Position, auch ohne NRTK-Dienst, überbrückt werden. Wenn das Mobilfunknetz dann wieder in ausreichender Güte vorhanden ist, verbindet sich der Empfänger automatisch wieder mit dem NRTK-Dienst und verwendet die normalen NRTK-Daten. Dieses Verfahren wird erfolgreich am Oberrhein auf WSA-Peilschiffen angewendet.

## Zusammenfassung und Ausblick

Kommerzielle Betreiber von Netzwerk-GNSS-Korrekturdaten-Diensten bieten in letzter Zeit ihren Kunden immer mehr PPP-Dienste an. In unterschiedlichen Genauigkeiten (von 2 bis 3 Zentimetern bis zu circa 10 Zentimetern), in unterschiedlich definierten Gebieten (Land, See oder Kontinent), als Überbrückung von Mobilfunklücken oder als einzige »differenzielle« Positionierungsmöglichkeit über Satellit oder Mobilfunk. Große Möglichkeiten bietet hier das Offshore-Geschäft und die Dienstleistungen, die damit verbunden sind. Daneben ist aber auch die industrielle Landwirtschaft ein Markt, der diese Daten benötigt. In Zukunft wird auch der Consumer-Markt, der mit autonomem Fahren einhergeht, von diesen Entwicklungen profitieren. Weitere Märkte werden weitere Entwicklungen fördern beziehungsweise fordern. Es bleibt spannend. //

### Weiterführende Literatur

Freitag, Martin (2022): PPP-RTK-Dienst der Adv – Jetzt wird es ernst. Vortrag auf der Intergeo in Essen

Heißelbarth, Anja (2018): GNSS in der Hydrographie. In: Hydrographie 2018 – Trend zu unbemannten Messsystemen; 170. DVW-Seminar und 32. Hydrographentag, Lindau, Wißner-Verlag, Seite 47–64

Hexagon (2023a): HxGN SmartNet Global. <https://hexagon.com/de/products/hxgn-smartnet/services/ppp-rtk>

Hexagon (2023b): TerraStar Correction Services. <https://novatel.com/products/gps-gnss-correction-services/terra-star-correction-services>

Hexagon (2020): Global Breakthrough in PPP Technology:

»RTK From the Sky«. White paper, [https://www.thegpstime.com/wp-content/uploads/2020/11/RTK-From-the-Sky\\_White-Paper\\_reduced-size-3.pdf](https://www.thegpstime.com/wp-content/uploads/2020/11/RTK-From-the-Sky_White-Paper_reduced-size-3.pdf)

Leica Geosystems (2023): Leica Viva GS10 & GS25 –

Hochpräzise Empfänger. <https://leica-geosystems.com/de/products/gnss-systems/receivers/leica-viva-gs10-gs25>

Schmitz, Martin; Gerhard Wübbena; Jannes Wübbena;

Temmo Wübbena (2021): SSR und zukünftige GNSS-Anwendungen. BfG-Kolloquium »Big, Smart, Geo Data«

# »Konvergenzzeiten treten idealerweise nur bei der Fahrt ins Einsatzgebiet auf«

Ein Interview mit LAMBERT WANNINGER

Lambert Wanninger ist Geodät und Professor am Geodätischen Institut der Technischen Universität Dresden. Seit den 1990er-Jahren liegt sein Forschungsschwerpunkt auf der präzisen GNSS-Positionierung. Im Interview mit den *Hydrographischen Nachrichten* erklärt er, welche GNSS-Techniken im Küstenbereich für die hochgenaue Positionierung eingesetzt werden können und was auf hoher See an Genauigkeiten zu erwarten ist. Außerdem denkt er über den Einsatz von Smartphones und noch kleineren Geräten für die Positionsbestimmung nach.

GNSS | RTK | Netz-RTK | PPP | PPP-RTK | Konvergenzzeit | LEO-GNSS-Konstellation | Smartphone  
GNSS | RTK | network RTK | PPP | PPP-RTK | convergence time | LEO GNSS constellation | smartphone

Lambert Wanninger is a geodesist and professor at the Geodetic Institute of the Technical University of Dresden. Since the 1990s, his research has focused on precise GNSS positioning. In this interview with *Hydrographische Nachrichten – Journal of Applied Hydrography*, he explains which GNSS techniques can be used in coastal areas for high-precision positioning and what accuracies can be expected on the high seas. He also considers the use of smartphones and even smaller devices for positioning.

## Interviewer

Das Interview mit Prof. Lambert Wanninger haben Lars Schiller and Patrick Westfeld im Mai per E-Mail geführt.

Textbearbeitung: Lars Schiller

Hydrographen wissen, wie man die Gewässertiefe misst. Doch zu wissen, wie tief das Wasser an einem bestimmten Ort ist, genügt nicht, solange die Koordinaten des Orts nicht bekannt sind. Diese Koordinaten müssen gleichzeitig erfasst werden. Wie stellt man das auf einem fahrenden Schiff an?

Im Satellitenzeitalter, im Zeitalter von GNSS, ist dies einfacher denn je und das mit einer technischen Lösung, die global und ununterbrochen funktioniert. Der Vorteil von Schiffen auf dem offenen Meer ist, dass die GNSS-Antennen so angebracht werden können, dass Messungen normalerweise ohne Signalabschattungen gelingen. Im Binnenbereich, teilweise auch in Hafenbereichen, muss man dagegen mit Signalunterbrechungen durch Bauwerke (zum Beispiel bei Brücken) und durch Uferbewuchs rechnen, sodass GNSS nicht mehr vollkommen unterbrechungsfrei zur Verfügung steht. Aber ansonsten ist dies doch eine ideale Situation: die gesamte, notwendige GNSS-Infrastruktur steht staatlicherseits finanziert und damit für den einzelnen Nutzer kostenlos zur Verfügung und man muss sich nicht weiter drum kümmern. Man muss sich nur einen geeigneten GNSS-Empfänger anschaffen, wobei es da einen funktionierenden Markt mit vielen Anbietern gibt.

Dies alles gilt, solange die Standardgenauigkeit von ein paar Metern ausreicht. Bei höheren Genauigkeitsansprüchen kann heutzutage zum Teil global, zum Teil auch nur regional auf geeignete Zusatzdienste zurückgegriffen werden. Geht es

um Dezimeter- oder sogar Zentimetergenauigkeit, dann sind diese Dienste aber oft kostenpflichtig und setzen einen geeigneten Kommunikationskanal für diese Zusatzinformationen und die entsprechende Auswertesoftware voraus.

So ein Schiff bewegt sich nicht nur linear in Fahrtrichtung vorwärts, sondern es rollt und stampft. Dadurch verändert sich die Position der GNSS-Antenne gegenüber der Position des Echolots. Was muss alles beachtet werden, um dem Echolot die richtigen Koordinaten zuzuordnen?

Es ergibt sich hier das übliche Problem zweier zu einem Gesamtsystem zu vereinigenden Messsensoren, die unterschiedliche Referenzpunkte haben und vielleicht auch zeitlich nicht synchronisiert sind. Erschwerend kommt hinzu, dass der Raumvektor vom Referenzpunkt der GNSS-Antennen zum Referenzpunkt des Echolotes zwar im Schiffskoordinatensystem recht stabil ist, aber dieses sich gegenüber dem globalen kartesischen System ständig verdreht aufgrund des Rollens, Stampfens und Gierens des Schiffes. Diese Lagewinkel müssen also erfasst werden, was mit inertialen Messsystemen gelingt und/oder mit GNSS-Multi-Antennen-Systemen. Bei der flugzeuggestützten Laserbathymetrie treten entsprechende Probleme auf.

Die Genauigkeit einer GNSS-Messung liegt bei vielleicht einem Meter. Wenn es genauer werden soll, braucht es Korrekturdaten von einer Referenzstation. Doch was geschieht auf dem Meer, wo es keine Referenzstationen gibt? Wie nah muss die

nächste Referenzstation sein, um zu brauchbaren Koordinaten zu kommen?

GNSS-Code-Messungen haben im günstigsten Fall Genauigkeiten auf dem Meterniveau. Die Zusatzinformationen, die notwendig sind, um aus Code-Messungen Positionen zu rechnen, nämlich die Ephemeriden (Satellitenorbit- und -uhrinformationen) werden durch die Satelliten selbst zur Verfügung gestellt und weisen auch Genauigkeiten auf dem Meterniveau auf. Damit werden dann Positionsgenauigkeiten auf dem Meterniveau erreicht.

Für deutlich höhere Genauigkeiten muss eine ganz andere Art von GNSS-Messungen und Auswertungen durchgeführt werden. Es muss auf die Phasenbeobachtungen übergegangen werden und es sind genauere und zum Teil weitere Zusatzinformationen notwendig, die aus den Beobachtungen von Referenzstationen gewonnen werden. Klassischerweise geschieht dies mit Verfahren der relativen Positionsbestimmung, zum Beispiel mit dem Verfahren, welches als Real-Time Kinematic (RTK) bekannt ist und eine zentimetergenaue Positionsbestimmung nach sehr kurzen Konvergenzzeiten von normalerweise kürzer als ein bis zwei Minuten ermöglicht. Dies funktioniert aber zuverlässig nur bis zu einigen Kilometern Abstand zur Referenzstation.

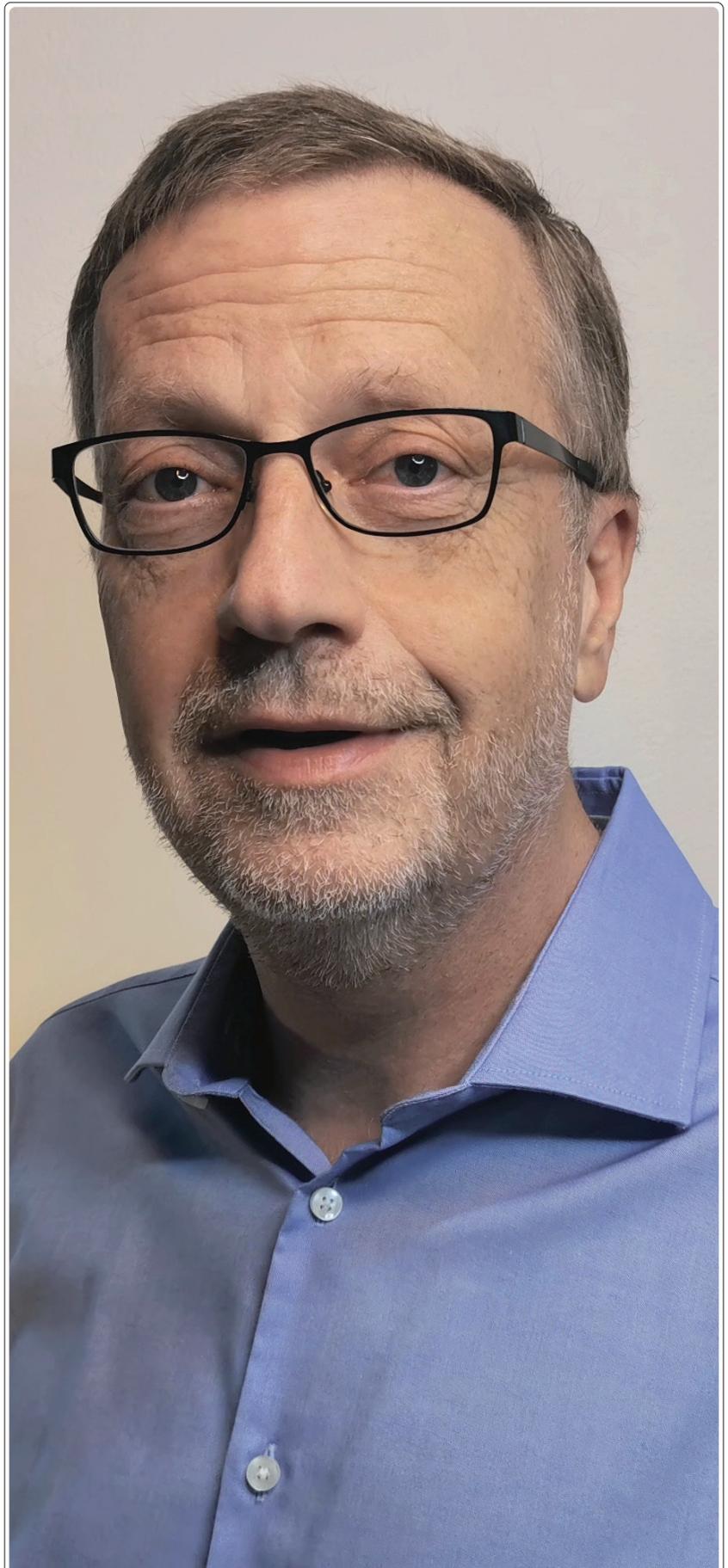
Und wenn man nun ein ganzes Netz an Referenzstationen zusammenschaltet?

Dann können diese Entfernungen deutlich vergrößert werden. Voraussetzung ist, dass das Netz der Referenzstationen die Nutzerstation umgibt. Die Referenzstationsbeobachtungen werden vorausgewertet und Korrekturen, insbesondere für Refraktionseinflüsse, werden flächenhaft interpoliert (Netz-RTK). Dies führt dann zu sogenannten Virtuellen Referenzstationen, die auf der Basis der Korrektionsmodelle für die jeweilige Nutzerposition speziell gerechnet werden.

Aber auf hoher See funktioniert das dann auch nicht, weil der Abstand zu den Referenzstationen an Land dann doch schnell dafür zu groß ist.

Hier kommt jetzt Precise Point Positioning ins Spiel. Welchen Vorteil bringt PPP?

Das klassische PPP beschränkt sich auf die Ephemeriden als Zusatzinformationen. Hier werden nun aber die Satellitenorbit- und -uhrinformationen im besten Fall mit Zentimetergenauigkeit zur Verfügung gestellt. Verwendet der Nutzer die Phasenbeobachtungen eines Mehrfrequenzempfängers, so sind Positionen mit wenigen Zentimetern Genauigkeit erzielbar, aber erst nach einer Konvergenzzeit von vielen oder sehr vielen Minuten. Für viele hydrographische Anwendungen auf See ist dies aber gut einsetzbar. Die Konvergenzzeiten treten idealerweise nur einmal am Anfang auf – bei der Fahrt ins Einsatzgebiet. Können Signalunterbrechungen vollständig vermieden werden,



Professor Lambert Wanninger

dann geht das hohe Genauigkeitsniveau auch nicht wieder verloren.

Alle Verfeinerungen von PPP haben immer das Ziel, die Konvergenzzeiten zu verringern. Dafür werden weitere Zusatzinformationen benötigt.

**Das Beste aus beiden Welten – sehen Sie Potenzial in der Kombination von Netz-RTK und PPP?**

In seiner höchsten Verfeinerungsstufe wird aus PPP dann PPP-RTK. Es hat dieselben Eigenschaften wie Netz-RTK. Voraussetzung ist ein relativ dichtes Netz von Referenzstationen, genau wie bei Netz-RTK. Und stehen dann alle diese Informationen zur Verfügung, dann werden auch die Konvergenzzeiten so kurz wie bei RTK oder Netz-RTK. Netz-RTK und PPP-RTK unterscheiden sich in der Art der Parametrisierung der Korrekptionsmodelle. PPP-RTK

*»PPP-RTK wird auf hoher See nicht funktionieren. Aber im Binnenbereich und im Küstenbereich wird sich die Technik in den nächsten Jahren sicherlich ausbreiten«*

Professor Lambert Wanninger

bietet da viele Vorteile bei der Datenkomprimierung und am Ende damit bei deren Aussendung. Auf Nutzerseite werden diese Daten normalerweise in die Daten einer Virtuellen Referenzstation gewandelt und diese dann für RTK verwendet.

PPP-RTK wird in dieser Form auf hoher See nicht funktionieren, da der Abstand zu Referenzstationen an Land dann wieder zu groß sein wird. Aber im Binnenbereich und zum Teil im Küstenbereich ist dies die Technik, die sich in den nächsten Jahren sicherlich ausbreiten wird. Nutzer werden aber nicht wirklich unterscheiden können, ob sie nun gerade Netz-RTK oder PPP-RTK verwenden.

**Bei der hydrographischen Tiefenmessung kommt es darauf an, zu wissen, welche Lage das Echolot während der Messung hatte. Da lassen sich auch im Post-Processing noch Korrekturen anbringen. Wenn es aber darum geht, Objekte an einer vorgegebenen Stelle zu positionieren, zum Beispiel beim Bau von Offshore-Windkraftanlagen, dann wird die hochgenaue Position sofort benötigt. Welche Methoden bieten sich dann an?**

Alle erwähnten Techniken (GNSS an sich oder mit Zusatzdiensten: RTK, Netz-RTK, PPP, PPP-RTK) sind echtzeitfähige Techniken, die dann natürlich auch im Post-Processing funktionieren. Bei Echtzeitanwendungen sind die Hürden für eine zuverlässige Datenverarbeitung aber höher. Beim Post-Processing besteht ein gewisses Potenzial, bessere Ergebnisse zu erzielen.

**Heutzutage gibt es nicht nur GPS-Satelliten, sondern auch Satelliten von GLONASS, BeiDou und Galileo. Wie gelingt es, die Signale verschiedener GNSS-Konstellationen gemeinsam auszuwerten?**

In der Frühphase der GNSS, als es noch nicht mal diesen Begriff gab, sondern nur GPS genutzt wur-

de, da war die GNSS-Welt noch recht übersichtlich mit zwei Signalfrequenzen und gerade mal so vielen Satelliten, dass eine kontinuierliche Positionsbestimmung unter guten Empfangsbedingungen möglich war. Heute sind wir bei vier vollständigen Systemen angelangt, die von zivilen Anwendern nie einzeln, sondern immer nur gemeinsam genutzt werden. Diese haben schon einzeln inzwischen mehr als zwei Signalfrequenzen und wenn die Signale und Frequenzen aller vier Systeme betrachtet werden, dann fällt es schwer bei allen Nummern und Bezeichnungen den Überblick zu behalten. Alle vier Systeme werden von ihren Betreibern sorgsam unabhängig von den anderen Systemen gehalten. So definiert jedes System sein eigenes geodätisches Referenzsystem, seine eigene Systemzeit. Und bei den Beobachtungsstationen in den Kontrollsegmenten gibt es offiziell keine Überschneidungen.

Und doch sind die Unterschiede zwischen den vier GNSS gering: alle nutzen dasselbe Messprinzip, ähnliche Signalfrequenzen und -codierungen, ähnliche Satellitenorbits, sehr ähnliche Referenzsysteme und so weiter. Im Endeffekt ist es nicht besonders viel komplexer, die Signale und Beobachtungen von allen vier Systemen auszuwerten als nur die von GPS.

**Dabei spielen sicher internationale Standards eine wichtige Rolle. Wie und wo wird das geregelt? Und klappt das immer reibungslos?**

Im Bereich GNSS sind Standards meist Formatbeschreibungen für den Austausch von Daten, also zum Beispiel das, was mit den Abkürzungen RTCM, RINEX oder NMEA beschrieben wird. Sie müssen veröffentlicht und von vielen Beteiligten, also Firmen oder Institutionen, die Produkte im Bereich GNSS herstellen oder Dienste anbieten, akzeptiert sein, damit sie ihren Zweck erfüllen. Bei GNSS betreffen sie insbesondere die Beobachtungsdaten der Empfänger und alle Produkte, die aus Referenzstationsbeobachtungen berechnet werden, und am Ende dann auch die berechneten Positionen. Idealerweise sind möglichst viele Beteiligte am Standardisierungsprozess beteiligt, sodass das Ergebnis weite Akzeptanz findet. Viele Beteiligte bedeutet aber natürlich auch, dass der Standardisierungsprozess zeitintensiv und für alle nervenaufreibend ist. Und die Ergebnisse stellen auch nicht immer alle zufrieden.

Deckt ein Beteiligter alle Stufen der GNSS-Positionsbestimmung mit seinen Produkten ab, so ist er nicht mehr unbedingt auf veröffentlichte Standards angewiesen. Er kann seine eigenen hausinternen, nicht veröffentlichten Datenformate verwenden, um die Daten zu senden, zu empfangen oder zu speichern. Dies bietet natürlich eine wesentlich größere Flexibilität bei notwendigen Erweiterungen oder Veränderungen der Formate. Hat ein solcher Beteiligter genügend Marktmacht,

so kommt er vielleicht auch auf die Idee, den Standardisierungsprozess zu boykottieren, also zu versuchen, die Weiterentwicklung der offenen Standards zu verzögern oder sogar zu verhindern. Da kommt es nun auf die anderen Beteiligten an, ob sie dagegen gemeinsam vorgehen oder unterschiedliche Interessen verfolgen.

Andere beteiligte Firmen, die nur einzelne Stufen der GNSS-Positionsbestimmung abdecken, sind auf diese Standards angewiesen, damit ihre Produkte in der Kette von Messungen–Korrekturen–Positionen verwendet werden können.

**GNSS-Systeme werden immer kleiner, leistungsstärker und vor allem auch preiswerter. Können wir uns eines Tages hochgenau und in Echtzeit mit dem Smartphone positionieren?**

In der ganz frühen Phase von GPS, also vor etwa 40 Jahren, gab es die Idee, dass es irgendwann sehr preiswerte Geräte in der Größe von Armbanduhren geben würde, die auf der Basis von Satellitensignalen, die eigene Position auf Millimeter oder zumindest Zentimeter bestimmen könnten. Damals dachte man bei solchen Geräten natürlich nicht an Smartphones, die in Ihrer Kombination von Kommunikation, Kamera, großer Rechenleistung,

GNSS-Empfänger und vielen weitere Sensoren nicht vorstellbar waren.

Die heutigen Smartphones bieten gute Voraussetzungen für hochgenaue GNSS-Positionsbestimmung. Alle haben einen GNSS-Chip integriert, manche von diesen können sogar Zwei-Frequenz-Signale verarbeiten und liefern auch Phasenbeobachtungen, die Voraussetzungen für hohe Genauigkeiten sind. Und dann ist es natürlich faszinierend, wie weit sie verbreitet sind.

Es gibt in einigen Smartphones GNSS-Chips, die für eine zentimetergenaue Positionsbestimmung geeignet wären. Aber die verbauten GNSS-Antennen haben nicht die entsprechenden Eigenschaften. Und es gibt bisher keine Antennen mit den notwendigen Eigenschaften, die in die heutigen rechteckigen, superflachen Smartphones passen würden.

**Müsste man also mit zusätzlichen, externen Antennen arbeiten?**

Aber dann bräuchten Smartphones einen geeigneten Antennenanschluss. Und dann wären sie nicht mehr die massenhaft verbreiteten Smartphones, sondern Spezialgeräte. Wenn sie mit besseren Antennen ausgerüstet würden und sie



## OBTAIN COMPREHENSIVE HYDROGRAPHIC DATA IN DEEP WATER AND COASTAL REGIONS

We draw on our vast experience and extensive resources, including a fleet of dedicated survey vessels and airborne systems, to deliver a high-quality service that meets your data objectives.

To find out more visit  
**fugro.com**

auch robuster und wetterfester gebaut würden, dann wäre man bei einer Geräteklasse, die es auch schon ansatzweise gibt, aber nie so weit verbreitet sein wird wie Smartphones.

**Welche Rolle spielt zu GNSS komplementäre Sensortechnologie?**

Komplementäre Sensortechnologie spielt in allen Anwendungsbereichen eine große Rolle, weil GNSS so starken Restriktionen unterliegt. GNSS funktioniert ja nur draußen und nur, wenn es nicht zu viele Signalabschattungen gibt. Dies gilt umso

---

*»Es gibt keine GNSS-Antennen, mit den notwendigen Eigenschaften, die in die heutigen rechteckigen, superflachen Smartphones passen würden«*

Professor Lambert Wanninger

---

mehr für die zentimetergenaue Positionsbestimmung, bei der man auf kontinuierliche Messungen, zumindest über einen kurzen Zeitraum, angewiesen ist. Sind die Signale aber häufig unterbrochen oder gibt es längere Signallücken, so ist ergänzende, komplementäre Sensortechnologie notwendig. Oder es wird sich bei dieser

Anwendung ganz von GNSS verabschiedet und auf andere Messtechniken ausgewichen, die aber von anderen Einschränkungen betroffen sind.

**Welche technischen Entwicklungen stehen uns bei GNSS noch bevor?**

Mit die interessanteste Entwicklung für eine nächste Generation von GNSS sind Satellitenkonstellationen, die sich in nur einigen hundert Kilometer Höhe befinden, in sogenannten LEO-Bahnhöhen, also wesentlich tiefer als die jetzigen GNSS-Satelliten in über 20.000 Kilometer Höhe. Konzepte und Verwirklichungen werden dazu insbesondere von privaten Firmen in Nordamerika und China vorangetrieben. Hier sieht man deutlich die Einflüsse einer privatisierten Raumfahrt. Von europäischer Seite ist aber auch die ESA aktiv und wird in den nächsten Jahren eine kleine Testkonstellation aufbauen. Aus der Sicht der Positionsbestimmung liefern Satelliten in niedrigen Orbits Signale, die eine vielfach stärkere Dopplerfrequenzverschiebung aufweisen, was ergänzende Techniken in der Positionsbestimmung mit Phasenbeobachtungen ermöglichen wird. Aber warten wir ab, wie die Entwicklung weitergeht. Private Investoren sind

daran interessiert, profitable Geschäftsmodelle zu verwirklichen. Doch werden LEO-GNSS-Konstellationen jemals profitabel sein, wenn die heutigen GNSS-Signale kostenfrei zur Verfügung stehen?

**Welches Anwendungspotenzial sehen Sie in der Weiterentwicklung der Technologie?**

Ich erwähnte zuvor die Vorstellung von der Armbanduhr mit integriertem Positionssensor, die uns millimeter- oder zumindest zentimetergenau unsere Position mitteilen kann, also hochgenaue Positionen für alle und am besten auch noch überall. Wenn man dies als ultimatives Ziel sieht, dann wird GNSS dabei eine wichtige Rolle spielen, aber aufgrund seiner Beschränktheit auch niemals der einzige Sensor sein. Smartphones mit ihrer Integration von GNSS, inertialen Sensoren, digitalen Karten und so weiter sind ja eine Entwicklung in diese Richtung. Aber auch sie sind noch sehr, sehr weit vom ultimativen Ziel entfernt.

**Mit welcher Forschungsfrage beschäftigen Sie sich zurzeit?**

Wir beschäftigen uns am Geodätischen Institut mit Fragestellungen rund um zentimetergenaue GNSS-Positionsbestimmung, also im Prinzip mit der geodätischen/vermessungstechnischen Nutzung von GNSS. Vor über einem Jahrzehnt standen hier die Probleme um die Erweiterung von GPS auf vier globale GNSS im Vordergrund. In den letzten Jahren war es dann die technische Entwicklung zu preisgünstigen, hochwertigen GNSS-Chips, die neue Massenmarktprodukte und -anwendungen ermöglichen. Augenblicklich sehe ich das größte Entwicklungspotenzial im Bereich der Korrekturdienstleistungen für verschiedene Arten des PPP, welche die zentimetergenaue Positionsbestimmung stark vereinfachen wird und für den Nutzer vermehrt kostenfrei zur Verfügung stehen werden.

**Was möchten Sie gerne besser können?**

Ich hätte gerne ein besseres Sprachtalent. Mit Deutsch und Englisch und Bruchstücken romanischer Sprachen ist mein Kopf gut ausgelastet. Leider sind kein Talent und keine Kapazität für das Lernen von zum Beispiel ostasiatischen Sprachen vorhanden.

**Was wissen Sie, ohne es beweisen zu können?**

Die Fähigkeiten der Menschheit werden oft maßlos überschätzt. //

# DHyG-Sonderpublikationen

Patrick Goffinet:

**Neue Bewertung der harmonischen Analyse im Vergleich zur Darstellung der Ungleichheiten am Beispiel der Deutschen Bucht**

DHyG-Sonderpublikation **Nr. 001**

DOI: 10.23784/DHyG-SP\_001

Hannes Nübel:

**Bathymetry from multispectral aerial images via Convolutional Neural Networks**

DHyG-Sonderpublikation **Nr. 002**

DOI: 10.23784/DHyG-SP\_002

Sophie Andree:

**Interactive processing of MBES bathymetry and backscatter data using Jupyter Notebook and Python**

DHyG-Sonderpublikation **Nr. 003**

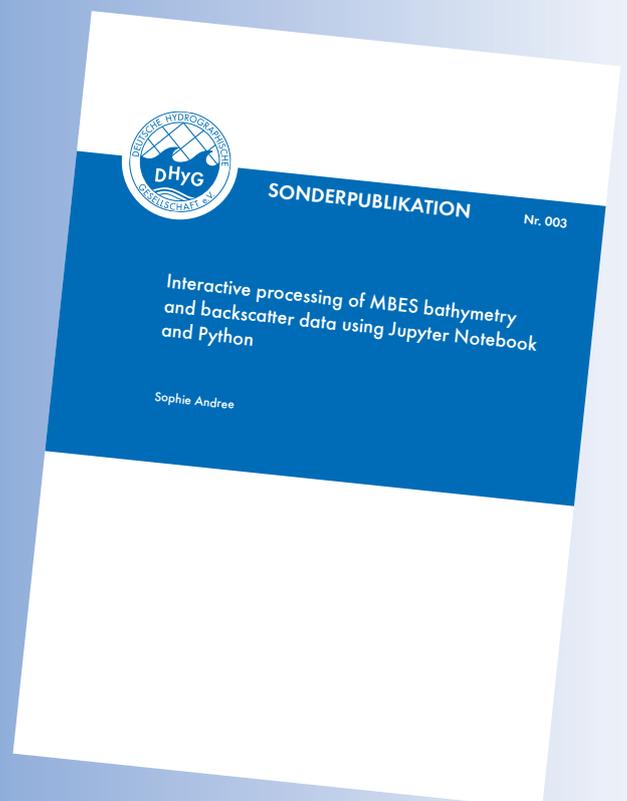
DOI: 10.23784/DHyG-SP\_003

Tina Kunde:

**Feasibility of high frequency multibeam snippet backscatter ammunition detection and evaluation of their position accuracy**

DHyG-Sonderpublikation **Nr. 004**

DOI: 10.23784/DHyG-SP\_004



# Autonome Unter-Wasser-Fahrzeuge für das hydrographische Monitoring von kritischen Infrastrukturen

Ein Beitrag von NIKLAS-MAXIMILIAN SCHILD, LUKAS KLATT, MARKUS KRAFT und HARALD STERNBERG

Pipelines stellen wichtige Versorgungsleitungen dar, die Energieträger über weite Strecken transportieren und Länder miteinander verbinden. Ein regelmäßiges Monitoring und rechtzeitige Detektion kleinerer Schäden verhindern größere Unfälle mit gravierenden Folgen für Mensch und Umwelt. Dafür stellen AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) inzwischen eine effiziente Erweiterung in der Hydrographie dar, da sie wirtschaftlich effizient und hochpräzise akustische, optische und elektromagnetische Sensordaten aus unmittelbarer Nähe der Pipeline aufnehmen können. In dem vom BMWK geförderten Forschungsprojekt CIAM werden Navigation, Objekterkennung und Autonomiegrad in einem Konsortium von neun Partnern aus Wissenschaft und Industrie weiterentwickelt.

AUV | ROS-Framework | Autonomiegrad | Objekterkennung | Pipelineinspektion | Imaging-Sonar | SLAM  
AUV | ROS framework | autonomy level | object detection | pipeline inspection | imaging sonar | SLAM

Pipelines are important supply lines that transport energy sources over long distances and connect countries with each other. Regular monitoring and timely detection of minor damage prevent major accidents with serious consequences for people and the environment. To this end, AUVs (autonomous underwater vehicles) are now an efficient extension in hydrography, as they can record economically efficient and highly precise acoustic, optical and electromagnetic sensor data from the immediate vicinity of the pipeline. In the CIAM research project funded by the BMWK, navigation, object detection and the level of autonomy are being further developed in a consortium of nine partners from science and industry.

## Autoren

Niklas-Maximilian Schild, Lukas Klatt und Markus Kraft sind wissenschaftliche Mitarbeiter an der HCU. Harald Sternberg ist Professor für Hydrographie an der HCU in Hamburg.

[niklas-maximilian.schild@hcu-hamburg.de](mailto:niklas-maximilian.schild@hcu-hamburg.de)

## Einleitung

Ein weltweites Netzwerk von Unter-Wasser-Pipelines transportiert kontinuierlich verschiedene Energieträger wie Öl, Gas und erneuerbare Energien über große Entfernungen. Es trägt zur Energieversorgung in zahlreichen Ländern der Welt bei und stellt so eine kritische Infrastruktur für die heutige Gesellschaft dar. Mögliche Beschädigungen oder Havarien würden schwerwiegende wirtschaftliche und ökologische Schäden erzeugen. Um diese Gefahr zu minimieren, ist eine regelmäßige Überwachung und Wartung der Pipelines notwendig. Herkömmliche hydrographische Datenerfassungsmethoden mit Vermessungsschiffen werden vermehrt durch unbemannte Vermessungssysteme ergänzt, um Effizienz und Präzision zu steigern, Datenlücken zu schließen und Umweltbelastungen zu verringern.

In diesem Zusammenhang hat sich die Entwicklung von autonomen Unter-Wasser-Fahrzeugen (AUVs) als innovative Methode für hydrographische Messungen erwiesen. AUVs bieten eine Reihe entscheidender Vorteile, die eine präzise und umweltfreundliche Datenerfassung ermöglichen.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Trägerplattformen können AUVs näher an den Meeresboden oder das zu vermessende Objekt heranfahren, was zu genaueren Messergebnissen und zu einem geringeren Eingriff auf das maritime Leben bzw. Ökosystem führt, da mit geringerer Schallleistung vermessen werden kann. Die leise und effiziente Fortbewegung eines AUV minimiert zudem Lärm- und Schadstoffemissionen und trägt somit zu einer umweltfreundlichen Datenerfassung bei. Die Autonomie ermöglicht den Einsatz ortsunabhängig von menschlichem Personal am zu vermessenden Objekt. Das AUV kann vorprogrammierten Routen folgen, komplexe Vermessungsaufgaben erfüllen und in schwer zugänglichen Gebieten arbeiten, was eine hohe Flexibilität und Effizienz bei der Datenerfassung ermöglicht. Das Risiko für die menschliche Besatzung wird reduziert, da diese nicht mehr in gefährliche Gebiete fahren müssen.

AUVs werden schon seit einiger Zeit erfolgreich in der Praxis eingesetzt. Dennoch müssen noch einige Herausforderung in der Weiterentwicklung bewältigt werden. Die Energieversorgung über

Batterien oder Brennstoffzellen ist ein elementarer Bestandteil, der die Nutzlast und Einsatzdauer begrenzt. Auch die Kommunikation mit dem Betriebspersonal ist eingeschränkt, da Funkwellen praktisch nicht durch die Wassersäule transportiert werden können. Dies stellt auch für die Navigation besondere Herausforderungen dar, da die Möglichkeit der Positionsbestimmung über GNSS nicht besteht (Schild 2022). An diese Herausforderungen lassen sich verschiedene Forschungsfragen knüpfen, die im Rahmen des Forschungsprojekts CIAM beantwortet werden sollen.

In diesem Beitrag stellen wir das laufende Forschungsprojekt CIAM vor, welches sich mit der Entwicklung eines AUV für hydrographische Messungen von kritischen Infrastrukturen befasst. Insbesondere erläutern wir die Implementierung eines Algorithmus für die autonome Verfolgung von Pipelines und das Navigationskonzept zur Gewährleistung einer präzisen Positionierung des AUV.

## Forschungsprojekt CIAM

Das Forschungsprojekt CIAM (Comprehensive Integrated and Fully Autonomous Subsea Monitoring) ist ein Verbundprojekt von insgesamt neun Projektpartnern aus Wissenschaft und Industrie. Ziel des Projekts, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, ist die Entwicklung einer integrierten und autonomen Lösung zur Überwachung kritischer Infrastrukturen in der Tiefsee. Projektziel ist, ein AUV zu konzipieren, das regelmäßige Inspektionen durchführen und den aufwendigen Einsatz von Tauchern oder bemannten Fahrzeugen ersetzen kann. Dazu werden verschiedene Funktionen wie Navigation, Sensordatenverarbeitung, Objekterkennung und Hindernisvermeidung implementiert. Um sicherzustellen, dass alle beteiligten Entwickler effizient zusammenarbeiten können, wurde eine einheitliche Struktur eingeführt, um die unterschiedlichen Softwareteile zu entwickeln und zusammenzuführen. Die Verwendung eines grundlegenden Frameworks gewährleistet, dass alle Softwareteile effizient miteinander interagieren und später nahtlos auf dem AUV installiert werden können. Ein Framework ist eine Art Vorlage oder Sammlung von Tools und Bibliotheken, die Entwickler:innen helfen, schnell und effizient Softwareanwendungen zu implementieren.

Im Falle des CIAM-Projekts wurde das Robot Operating System (ROS) als Basis-Framework ausgewählt, da es sich speziell bei der Entwicklung von Robotik-Anwendungen in der Praxis bewährt hat. Ein Vorteil der Microservice-Struktur ist die einfache Integration verschiedener Softwarebausteine sowie die zahlreichen bereits bestehenden Tools und Bibliotheken. Dazu gehören zum Beispiel die Möglichkeit, verschiedene Hardwarekom-

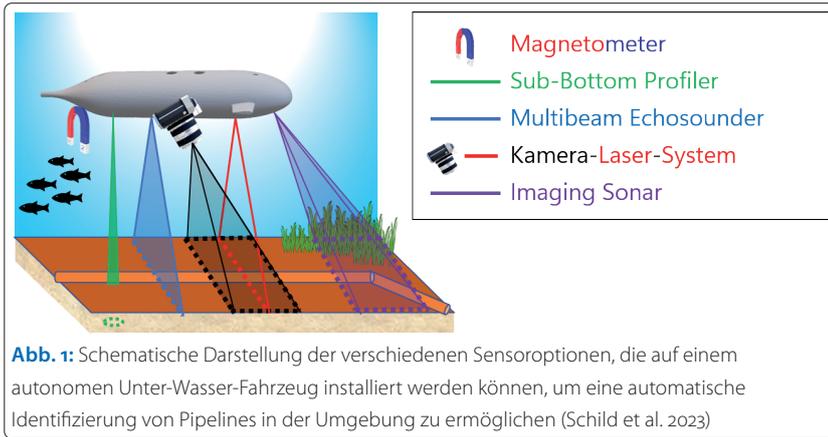
ponenten und Sensoren zu steuern, Transformationen zwischen einzelnen Koordinatensystemen durchzuführen oder Karten von der Umgebung in 3D darzustellen (Linzer et al. 2022). ROS stellt auch eine umfassende Dokumentation und Unterstützung durch eine aktive Community von Entwickler:innen zur Verfügung, die bei der Implementierung von Algorithmen und der Behebung von möglichen Problemen helfen können. Zusätzlich bietet ROS die Flexibilität, mit verschiedenen Betriebssystemen wie Linux, Windows und MacOS sowie verschiedenen Programmiersprachen wie C++, Python und Java zu arbeiten. Dies ermöglicht Entwickler:innen, die am Projekt beteiligt sind, ihre bevorzugte Programmiersprache und das Betriebssystem zu wählen und dennoch problemlos mit dem ROS-Framework zu interagieren.

## Aufnahme von Testdaten

Um Testdaten einer Unter-Wasser-Pipeline aufzuzeichnen und Algorithmen zu implementieren und zu bewerten, wurde ein Pipeline-Mockup in ein Reservoir eingetaucht. Dieses Mockup besteht aus acht separaten Komponenten mit einem Durchmesser von jeweils 219 mm und hat die Form eines geschlossenen achteckigen Rings mit einem Durchmesser von 40 Metern. Die Struktur wurde von einer Testplattform beobachtet, die mit zahlreichen Sensoren ausgestattet ist, wie zum Beispiel einem Imaging-Sonar und einem Inertialnavigationssystem zur Positionsbestimmung. Die Testplattform bewegte sich unter Wasser in einem Abstand von etwa 2,3 m über der Pipeline (Smith et al. 2022). Die mit dem Imaging-Sonar durchgeführte Vermessung erfasste nicht nur die Pipeline, sondern auch einzelne Felsen im Reservoir. Die Messdaten der unterschiedlichen Sensoren wurden im Rosbag-Format gespeichert. Durch die Verwendung dieses standardisierten Formats können Rosbags beliebig oft von verschiedenen Projektpartnern in ROS wiedergegeben werden. Dies ermöglicht die wiederholte Ausführung des Messablaufs und erleichtert die Entwicklung und Überprüfung eines ROS-Knotens (Linzer et al. 2022). Der mit einem Rosbag entwickelte Algorithmus kann mit Hilfe anderer Rosbags überprüft oder direkt in das AUV integriert und bei einer echten Messfahrt eingesetzt werden.

## Autonome Identifizierung von Pipelines in Imaging-Sonar-Messdaten

Ein entscheidender Faktor bei der Entwicklung eines effizienten AUV für die Pipelineinspektion ist die Fähigkeit, Pipelines automatisch zu erkennen und zu verfolgen (Kraft 2022). Diese Aufgabe ist jedoch aufgrund der schlechten Sicht und der komplexen Bedingungen, die in vielen Unter-Wasser-Umgebungen herrschen, eine große Herausforderung. Es gibt zahlreiche Sensoren, die für



**Abb. 1:** Schematische Darstellung der verschiedenen Sensoroptionen, die auf einem autonomen Unter-Wasser-Fahrzeug installiert werden können, um eine automatische Identifizierung von Pipelines in der Umgebung zu ermöglichen (Schild et al. 2023)

diese Aufgabe denkbar sind (siehe Abb. 1). Während optische Systeme wie Kamera-Laser-Systeme in klaren Gewässern gut funktionieren, sind sie in schwierigeren Bedingungen und in Gebieten mit schlechter Wasserqualität oft unzureichend. Eine vielversprechende Ergänzung ist der Einsatz von Imaging-Sonaren, welche akustische Bilder der Umgebung liefern können. Durch den Einsatz akustischer Sensoren können sowohl in klaren als auch in trüben Gewässern genaue Ergebnisse erzielt werden. Im Vergleich zu anderen akustischen Sensoren wie Fächerecholoten (multibeam echo sounder), Vertikalecholoten (single-beam echo sounder) oder Sedimentecholoten (sub-bottom profiler) hat ein Imaging-Sonar einen entscheidenden Vorteil: Es kann in Fahrtrichtung ausgerichtet werden. Dadurch erkennt es den Verlauf der Pipeline mehrere Meter im Voraus, was zur Optimierung der Routenplanung des AUV beiträgt. Diese Methode bietet erhebliche Kosten- und Zeiteinsparungen, da das AUV Hindernisse effektiver umfahren und unnötige Umwege vermeiden kann.

Um die Unterwasserwelt abzutasten, sendet ein Imaging-Sonar einen horizontalen Fächer von Hochfrequenzstrahlen, typischerweise im Bereich von 600 bis 800 kHz, in die Wassersäule. Dieser Fächer ist wie in Abb. 2a dargestellt aufgebaut und besteht aus einer bestimmten Anzahl von Strah-

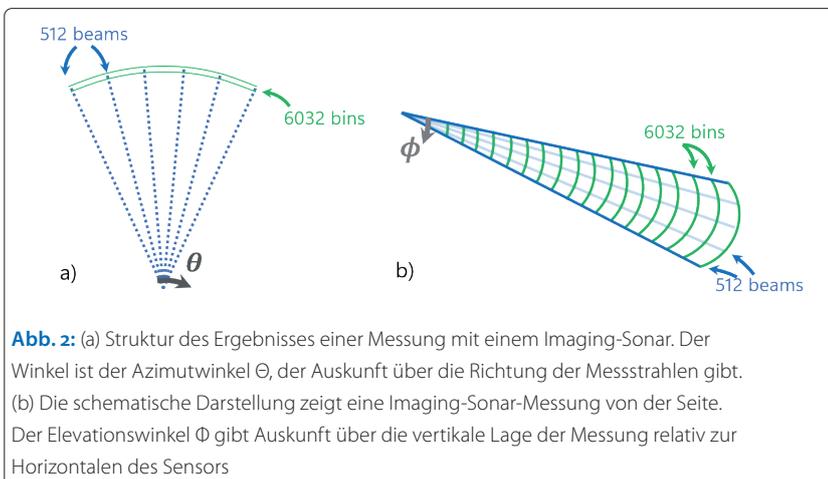
len. Jeder dieser Strahlen hat eine bestimmte Anzahl von Bins, die kontinuierlich die Intensität des reflektierten Signals aufzeichnen (siehe Abb. 2b). Das zur Aufzeichnung der Daten verwendete Imaging-Sonar, das Tritech Gemini 720is, verfügt über 512 Strahlen und 6032 einzelne Intensitätsmessungen innerhalb eines Strahls (Tritech 2021). Mit diesen hochauflösenden Daten kann das AUV die Pipeline und ihre Umgebung präzise erfassen.

Um die Pipeline in den Messdaten eines Imaging-Sonars automatisch zu identifizieren und sowohl die Position als auch die Orientierung der Pipeline zu bestimmen, sind einige Verarbeitungsschritte erforderlich. Die für diese Aufgabe entwickelte Methode basiert auf der Annahme, dass eine Pipeline in den Daten eine zusammenhängende, längliche Ansammlung von Punkten darstellt. Um relevante Pipeline-Objekte zu identifizieren, wird der entwickelte Algorithmus folgende Schritte durchführen: Zunächst wird der relevante Messbereich ermittelt, dann werden alle Objekte in den Messdaten segmentiert und schließlich wird eine geometrische Analyse angewendet, um das Objekt zu identifizieren, das höchstwahrscheinlich eine Pipeline darstellt. Die Schritte und Details der automatischen Filterung sind bei Schild et al. (2023) nachzulesen und werden daher im Folgenden nur kurz erörtert.

Um die Effizienz bei der Suche nach Pipelines zu verbessern, wird die Datenmenge der einzelnen Messungen reduziert, indem zunächst der wesentliche Messbereich herausgefiltert wird. Dieser Bereich umfasst die grün markierten Bins in Abb. 3, welche Messungen beinhalten, die Informationen über den Meeresboden und die dort verlaufenden Pipelines liefern. Die blau hervorgehobenen Bins dagegen sind für die Suche nach Pipelines nicht relevant, da sie den Bereich zwischen dem Sensor und dem Meeresboden darstellen. Der schwarze Bereich zeigt das fehlende Signal aufgrund der vollständigen Reflexion vom Meeresboden, was zu einem Messrauschen führt.

Zur Bestimmung des wesentlichen Messbereichs wurde eine automatische Filtermethode entwickelt, die auf der Analyse des Signal-Rausch-Verhältnisses der einzelnen Bins aufbaut. Die Methode basiert auf der Annahme, dass die Standardabweichung im Bereich zwischen dem Sensor und dem Meeresboden aufgrund fehlender Reflexionen gering ist, während sie im hinteren Bereich (bei Messungen im Boden) mangels fehlender Reflexionen und des Sensorverstärkungsrauschens hoch ist.

Nachdem der Punktwolkendatensatz automatisch und sinnvoll reduziert wurde, besteht das Ziel der Segmentierung darin, Objekte zu identifizieren und zu extrahieren, die potenziell eine Rohrleitung darstellen könnten. Bei diesem Prozess werden alle zusammenhängenden Punktcluster innerhalb des

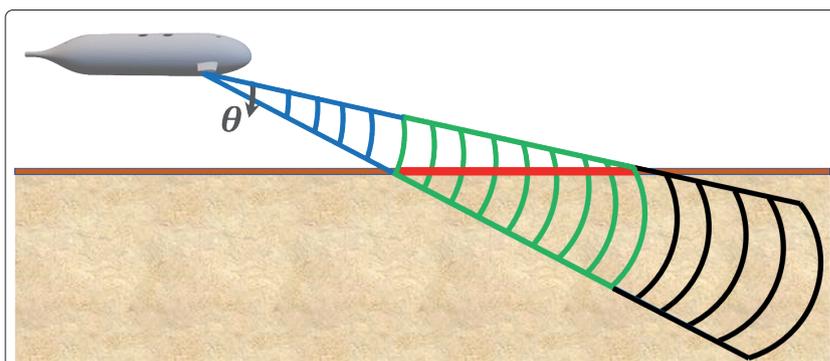


**Abb. 2:** (a) Struktur des Ergebnisses einer Messung mit einem Imaging-Sonar. Der Winkel ist der Azimutwinkel  $\theta$ , der Auskunft über die Richtung der Messstrahlen gibt. (b) Die schematische Darstellung zeigt eine Imaging-Sonar-Messung von der Seite. Der Elevationswinkel  $\phi$  gibt Auskunft über die vertikale Lage der Messung relativ zur Horizontalen des Sensors

Datensatzes gesucht und dann alle kleinen Punktcluster verworfen, bei denen es unwahrscheinlich ist, dass sie einer Rohrleitung entsprechen. Ein Beispiel für einen angewendeten Filter ist der *radius outlier removal filter*, der auf die verbleibenden Messdaten angewandt wurde. Dieser Filter entfernt Datenpunkte, die nicht genügend Nachbarpunkte innerhalb eines bestimmten Radius haben (Prio et al. 2022). Denn bei kleinen Punktansammlungen sind nicht genügend Punkte vorhanden, um zuverlässig zu identifizieren, ob es sich um eine Pipeline handelt oder nicht.

In der abschließenden geometrischen Analyse werden alle länglichen Punktansammlungen mit einer bestimmten Sollbreite gesucht, der Rest wird verworfen. Die Sollbreite wird anhand des bekannten Durchmessers einer Pipeline und der Höhe des AUV über dem Boden geschätzt. Die Höhe über dem Boden kann mit einem DVL bestimmt werden. Die ermittelte Sollbreite wird als Eingabe für einen RANSAC-Algorithmus verwendet, um die bestmögliche Linie in den Daten zu finden (Fischler und Bolles 1981). Anhand der Richtung der gefundenen Linie und des Startpunkts des Punktclusters kann die Lage und Ausrichtung eines Objekts bestimmt werden, bei dem es sich höchstwahrscheinlich um eine Pipeline handelt. Der RANSAC-Algorithmus wird dann wiederholt, um festzustellen, ob noch ein Pipeline-Segment in den Daten vorhanden ist. Dies ist besonders nützlich, wenn eine Verzweigung einer Rohrleitung auftritt und somit für eine effiziente Routenplanung unerlässlich wäre.

Abb. 4a zeigt eine Imaging-Sonar-Messung, die eine Rohrleitung mit einer Verzweigung enthält. In Abb. 4b wird das Ergebnis dargestellt, das automatisch vom Algorithmus erzielt wurde. Trotz des starken Messrauschens und zusätzlicher Linien konnte der Algorithmus beide Rohrleitungsegmente zuverlässig erkennen. Die Erkennung beider



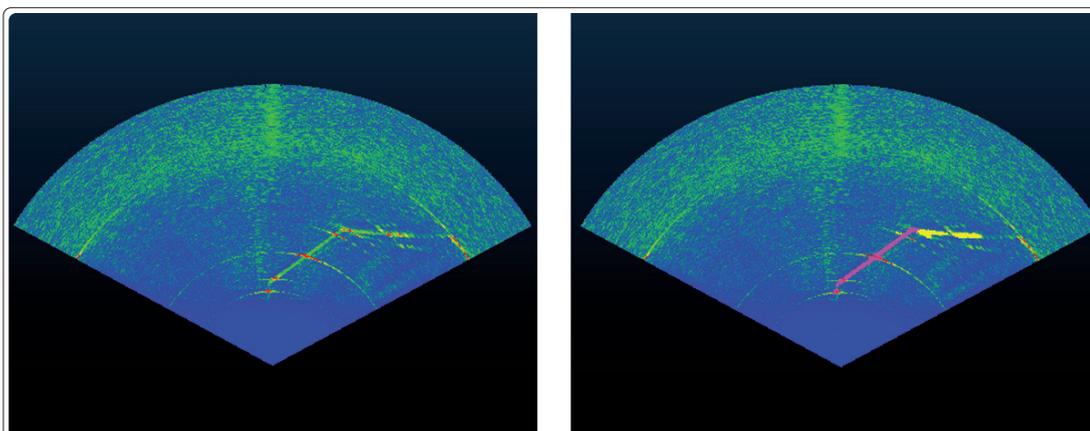
**Abb. 3:** Seitenansicht einer Messung, die mit einem auf den Meeresboden gerichteten Imaging Sonar durchgeführt wird. Der grüne Bereich enthält die relevanten Messungen zum Auffinden von Pipelines in den Messdaten

Segmente ermöglicht es dem AUV, der Pipeline zu folgen und sich effizient auf die bevorstehende Richtungsänderung der Pipeline vorzubereiten.

Im restlichen Datensatz wurde die Pipeline ebenfalls zuverlässig erkannt. Der Algorithmus identifizierte die Punkte, die zu einer Pipeline gehören, und ermittelt die Lage und Ausrichtung der Pipeline.

### Navigation eines autonomen Unterwasser-Fahrzeugs

Die Navigation ist unter Wasser eine besonders aufwendige Herausforderung. Es gilt, sowohl die Steuerung des AUV sicherzustellen als auch die aufgenommenen Sensordaten für die weitere Untersuchung und Analyse zu georeferenzieren. Bei der Überwachung von Versorgungsstrukturen wie Pipelines und Tiefseekabeln gelten besondere Herausforderungen, denen begegnet werden muss. Im Projekt wird ein komplexer Kalmanfilter zur Sensordatenfusion eingesetzt. Aufgabe ist dabei, die Präzision, Robustheit und Zuverlässigkeit der Positionsbestimmung durch Weiterentwicklungen und kaskadierte Ergänzungen zu optimieren.



a)

**Abb. 4:** (a) Vermessung des Meeresbodens, auf dem sich eine Pipeline befindet, mit einem Imaging-Sonar.

b) Die rosa und gelb hervorgehobenen Punkte sind jeweils Segmente, die von dem entwickelten Algorithmus erfolgreich als Pipelines erkannt wurden (Schild et al. 2023)

b)

Grundsätzlich gilt, dass zwischen relativen und absoluten Fehlern bei der Ortsbestimmung unterschieden werden muss. Eine hohe relative Präzision und Richtigkeit zu einem lokalen Koordinatensystem ist wichtig für die Sensordatenauswertung und ist Basis zur Detektion von möglichen Schadstellen. Für eine robuste Navigation muss eine absolute Genauigkeit im globalen Referenzsystem von ausreichender Qualität erreicht werden. Dabei ist insbesondere die Zuverlässigkeit und geringe Ausfallwahrscheinlichkeit wichtig, die auch unter kritischen Einsatzbedingungen gewährleistet werden muss.

Der wichtigste Baustein der Navigation von AUVs ist die Koppelnavigation, bei der das U-Boot auf Basis von Beschleunigungs-, Drehraten- und Magnetfeldsensoren die Position des Systems ermittelt. Unterstützend können Doppler Velocity Logger eingesetzt werden, um Informationen über die Strömung oder die Geschwindigkeit über Grund zu erhalten. Wie bei jedem inertialen Messsystem, führen Messrauschen und kleinere Kalibrierfehler kontinuierlich zu kleineren Abweichungen in der Lage- und Kursbestimmung. Diese summieren sich mit fortschreitender Missionszeit fort, sodass der Drift der inertialen Navigation eine Georeferenzierung des Systems und der aufgenommenen Sensordaten erschwert.

Für diese Herausforderung lässt sich die inertielle Navigation von der Wasseroberfläche aus unterstützen. Ein Mutterschiff oder auch begleitendes Autonomous Surface Vessel (ASV) kann die eigene Position klassisch über GNSS ermitteln und über ein USBL-System (Ultra-short Baseline) mit akustischen Signalen an das AUV kommunizieren. Diese Nachrichten fließen als Updates in den komplexen Filter ein und bieten der Positionsschätzung Informationen mit einer haltbaren absoluten Lagegenauigkeit.

Um den Autonomiegrad des AUV zu steigern und Kosten beim Betrieb zu senken, werden in CIAM Möglichkeiten untersucht, ohne begleitendes Schiff zuverlässig die eigene Position zu bestimmen.

Eine Möglichkeit zur Elimination des Drifts bei der Koppelnavigation ist die audio-visuelle Odometrie. Das AUV kann vorbeiziehende Features zur Bestimmung der absolut zurückgelegten Entfernung verwenden; vergleichbar mit der Geschwindigkeitsbestimmung bei Autos durch Zählen der Umdrehungen der Reifen. Insbesondere regelmäßig auftretende Ereignisse wie Verbindungsstücke zwischen einzelnen Segmenten sowie Halterungen sind dafür geeignet. Weiterhin wird im Projekt der Ersatz der sonst üblichen fiberoptischen Gyrometer (FOG) durch IMUs auf Basis mikroelektronisch-mechanischer Systeme (MEMS) geprüft. Im Projekt durchgeführte Laborarbeiten und Herstellerangaben geben höhere Ungenauigkeitseigenschaften für MEMS an, sodass die Erweiterung insbesondere

der Kursbestimmung durch extrinsische Informationen zielführend erscheint. Für eine gezielte Unterstützung der Orientierung durch Magnetometer und gyroskopische Sensoren lassen sich bildgebende Sonarverfahren wie das Imaging-Sonar sowie nach unten gerichtete Kameras verwenden. Die Daten werden in zwei Stufen ausgewertet. Zunächst findet eine Feature-Erkennung und Bildsegmentierung statt, gefolgt von einer Schätzung der Kursparameter. Diese Schätzung wird durch ein trainiertes neuronales Netzwerk vorgenommen, das die Gewichtung bei der Sensordatenfusion vorhersagt. Erste Projektergebnisse deuten auf ein vielversprechendes Potenzial hin.

Neben der Weiterentwicklung und Ergänzung der Koppelnavigation wird im CIAM-Projekt untersucht, ob auch A-priori-Informationen AUVs dabei unterstützen können, ihre Position zu bestimmen. Diese Informationen können aus verschiedenen Quellen stammen, einschließlich Karten oder bereits bekannten Standorten von Unter-Wasser-Objekten oder Features von oder neben Pipelines. Das können Strukturen an der Pipeline sein (Verbindungen, Patches oder Knicke) sowie Strukturen in unmittelbarer Umgebung des Untersuchungsobjekts (Wracks, Riffe und Felsstrukturen). Auch aufgedruckte Features wie Nummerierungen oder Schriftzüge lassen sich als Landmarken verwenden. Eine solche Navigation mit A-priori-Informationen ermöglicht es dem U-Boot, seine Position zu ermitteln und Updates in die Sensorfusion einfließen zu lassen. Die Qualität dieser Updates liegt ähnlich wie bei USBL-Updates weniger in der Präzision, sondern vielmehr in der Zuverlässigkeit und Richtigkeit der absoluten Lage.

Eine weitere Methode zur Navigation, die bei autonomen Unter-Wasser-Booten verwendet werden kann, ist das Vorgehen der gleichzeitigen Lokalisierung und Kartierung (simultaneous localisation and mapping – SLAM). SLAM ist ein Verfahren, bei dem das U-Boot seine Umgebung kartiert und gleichzeitig seine Position in der Karte bestimmt. Mit Hilfe einer echtzeitfähigen Umgebungsrepräsentation lässt sich vom AUV die Umwelt scannen, eine Karte erstellen und die Position innerhalb dieser Karte schätzen. Diese rechenaufwendige Aufgabe bietet jedoch erst ihre Vorteile, wenn ein Loop-Closure eintritt und Features aus unterschiedlichen Perspektiven ermittelt werden können. Dieses Szenario ist bei der Pipeline-Überwachung eher unwahrscheinlich.

Durch die Kombination verschiedener Navigationsmethoden können autonome Unter-Wasser-Roboter ihre Position mit höherer Genauigkeit bestimmen und ihre Missionen effektiver ausführen. Schließlich bietet eine echtzeitfähige semantische Umgebungsrepräsentation in Verbindung mit einer robusten Navigation die Möglichkeit, die Steuerung des AUV zu erweitern. So kann die Kollision mit

statischen Hindernissen vermieden, beweglichen Objekten ausgewichen oder Points of Interests wie Schadstellen können gezielt untersucht werden.

## Zusammenfassung

Natürliche Ressourcen wie Öl und Gas spielen eine wichtige Rolle bei der Energieversorgung und sind für die Weltwirtschaft von großer Bedeutung. Pipelines sind eine der wichtigsten Infrastrukturen für den Transport dieser Ressourcen. Rohrbrüche und Lecks in Unter-Wasser-Pipelines können jedoch erhebliche Schäden verursachen, sowohl für die Umwelt als auch für die Wirtschaft.

Daher ist die regelmäßige Überwachung von Unter-Wasser-Pipelines von entscheidender Bedeutung, um potenzielle Schäden frühzeitig zu erkennen und Maßnahmen zu ihrer Vermeidung zu ergreifen. Herkömmliche, von Schiffen durchgeführte Vermessungsmethoden sind jedoch nicht immer ausreichend, da sie zeitaufwendig sind und nur begrenzte Daten liefern können. Die Entwicklung von autonomen Unter-Wasser-Fahrzeugen (AUVs) bietet eine vielversprechende Ergänzung. Durch den Einsatz von AUVs können Pipelines genauer vermessen werden, während gleichzeitig die Umweltauswirkungen minimiert werden.

Die Entwicklung eines AUV ist eine enorme Herausforderung, da es unter anderem autonom navigieren, präzise Messungen durchführen und Kollisionen mit Hindernissen vermeiden muss. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Forschungsprojekts CIAM arbeiten neun Projektpartner an der Entwicklung eines solchen AUV. Ein wichtiger Aspekt der AUV-Entwicklung ist die autonome Verfolgung einer Pipeline. Hierfür eignet sich insbesondere ein Imaging-Sonar, welches in Fahrtrichtung ausgerichtet werden kann und somit

den zukünftigen Verlauf einer Pipeline bestimmen kann. Dies kann wiederum in der Routenplanung effizient berücksichtigt werden. Um dies zu ermöglichen, wurde ein Algorithmus entwickelt und in diesem Beitrag vorgestellt, der in der Lage ist, eine Pipeline in den Imaging-Sonar-Daten automatisch zu identifizieren. Dank dieses Algorithmus kann ein AUV eine Pipeline präzise verfolgen und Vermessungsdaten sammeln, ohne menschliches Eingreifen zu erfordern.

Ein weiterer spannender Aspekt, der im Rahmen dieses Beitrags vorgestellt wurde, betrifft das autonome Navigieren eines AUV. Dies ist einerseits notwendig, um georeferenzierte Sensordaten zur Untersuchung und Analyse der Pipeline zu erfassen, andererseits gewährleistet es auch, dass das AUV mit den aufgezeichneten Daten sicher zurückkehren kann. Eine besondere Herausforderung bei der Positionierung von AUVs unter Wasser stellt das Fehlen von GNSS-Signalen dar, da diese aufgrund der Eigenschaften des Wassers nicht in dieses eindringen können. Um die Positionierung unter Wasser zu ermöglichen, kommen unter anderem Inertialnavigationssysteme zum Einsatz. Diese Systeme nutzen Gyroskope, Beschleunigungssensoren und Magnetometer, um die Position des AUV zu bestimmen. Allerdings führen geringfügige Abweichungen, die beispielsweise durch Messrauschen entstehen, im Verlauf der Mission zu einer fortschreitenden Anhäufung von Abweichungen. Daher müssen Inertialnavigationssysteme durch andere Methoden unterstützt werden, um eine präzise Navigation zu gewährleisten. In diesem Beitrag wurden vielversprechende Möglichkeiten vorgestellt, wie die Unterstützung durch Umgebungsinformationen, die im weiteren Verlauf des Projekts eingehender untersucht und implementiert werden sollen. //

## Literatur

- Fischler, Martin A.; Robert C. Bolles (1981): Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM, DOI: 10.1145/358669.358692
- Kraft, Markus (2022): Pipelinedetektion durch Autonomes Underwater Vehicles (AUVs). In: MST 2022 – Multisensortechnologie: Von (A)nwendungen bis (Z)ukunftstechnologien. DVW-Schriftenreihe, Band 103
- Linzer, Finn; Niklas-Maximilian Schild; Jens-AndréPaffenholz (2022): ROS im Multisensorsystem – Am Beispiel von geodätischen Anwendungen. In: MST 2022 – Multisensortechnologie: Von (A)nwendungen bis (Z)ukunftstechnologien. DVW-Schriftenreihe, Band 103
- Prio, Makhluq Hossain; Sahil Patel; Goutam Koley (2022): Implementation of Dynamic Radius Outlier Removal (DROR) Algorithm on LiDAR Point Cloud Data with Arbitrary White Noise Addition. 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference, Helsinki, DOI: 10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860643
- Schild, Niklas-Maximilian (2022): Wo geht's lang im Dunkeln? Positionierung und Navigation unter Wasser am Beispiel eines AUV. In: Hydrographie – Messen mit allen Sinnen, DVW-Schriftenreihe, Band 102
- Schild, Niklas-Maximilian; Lukas Klatt; Markus Kraft (2023): Subsea pipeline tracking using a forward-looking imaging sonar for autonomous underwater vehicle. FIG Working Week 2023, Orlando, USA
- Smith, Amos; Jeremy Coffelt; Kai Lingemann (2022): A Deep Learning Framework for Semantic Segmentation of Underwater Environments. OCEANS 2022, DOI: 10.1109/OCEANS47191.2022.9977212
- Tritech (2021): Gemini 720is Real-time multibeam imaging sonar. Datasheet

# Positioning robotic systems under ice

## A summary of challenges and potential ways forward

An article by CHRISTIAN KATLEIN

Determining the position of underwater vehicles is crucial to any operation underneath the water. But when remotely operated vehicles (ROV) and autonomous underwater vehicles (AUV) venture underneath the frozen surface of polar waters, the knowledge of their position becomes absolutely crucial. Not only because any observation is only worth half as much if you do not know where it was taken, but particularly because underneath ice cover knowing its position is crucial for a robotic vehicle to be able to travel back to a spot where it can get recovered from underneath the icy blanket. However, in the under-ice environment, many factors make position estimation significantly more difficult. These challenges and potential solutions will be summarised in the following.

autonomous vehicles | under-ice operation | acoustics | positioning | vehicle navigation  
autonome Fahrzeuge | Unter-Eis-Einsatz | Akustik | Positionierung | Fahrzeugnavigation

Die Bestimmung der Position von Unter-Wasser-Fahrzeugen ist für jeden Einsatz unter Wasser entscheidend. Aber wenn sich ferngesteuerte Fahrzeuge (ROV) und autonome Unter-Wasser-Fahrzeuge (AUV) unter die gefrorene Oberfläche der polaren Gewässer wagen, ist die Kenntnis ihrer Position absolut entscheidend. Nicht nur, weil jede Beobachtung nur halb so viel wert ist, wenn man nicht weiß, wo sie gemacht wurde, sondern vor allem, weil unter der Eisdecke die Kenntnis der Position entscheidend dafür ist, dass ein Roboterfahrzeug zu einer Stelle zurückkehren kann, an der es aus der Eisdecke geborgen werden kann. Unter der Eisdecke erschweren jedoch viele Faktoren die Positionsbestimmung erheblich. Diese Herausforderungen und mögliche Lösungen werden im Folgenden zusammengefasst.

### Author

Dr. Christian Katlein is a sea ice scientist and robotics specialist in the scientific technical council of the project Polarstern 2, Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven.

[Christian.Katlein@awi.de](mailto:Christian.Katlein@awi.de)

When talking about robotic exploration under ice on planet earth, a few possible scenarios come to mind. The most benign is often used as a test case during development programmes and consists of a lake with frozen surface. Here a relatively thin ice cover provides comparably easy access for the deployment of underwater vehicles, and the vehicle position is constrained by the lake volume, which – while still extensive – can be a big plus in the case of a lost vehicle. A more complex situation particularly given the logistics of access is the operation on the landfast sea ice in fjords or around coasts. What really steps up the game, however, is a deployment underneath the freely drifting ice covers in the Arctic or Antarctic Ocean. Here the movement of sea ice with wind and current starts to complicate all positioning efforts. While positioning in the world fixed reference of exploration underneath the big glacial ice sheets of the Antarctic is technically slightly easier, the absolutely impenetrable top layer of the ice shelf dramatically increases mission risk: Any vehicle malfunction will very likely result in loss of the vehicle as sur-

facing underneath a hundreds of metre thick ice shelf does not provide a safe haven. Knowing vehicle position and being able to navigate accordingly becomes a key element of mission success in these scenarios.

If robotic operations under ice are so challenging, why even wander under ice and risk expensive robotics assets? The driving forces of under-ice robotic exploration were shared between the curiosity of polar researchers and the interest of defence organisations in gaining superiority in a hard to access region. Only in the last decade, under-ice robotics has become of interest to the energy sector as well, where oil and gas installations are moving to even more extreme areas of our planet. Over the last 50 years, many programmes have proven that operations under ice are feasible: The first dives under Arctic sea ice were conducted by the Unmanned Arctic Research Submersible developed by the University of Washington in 1972, later followed by the International Submarine Engineering (ISE) vehicle *Theseus* laying hundreds of kilometres of fibre optic cable underneath sea ice in 1995. A

big milestone was also the Autosub programme of the National Oceanography Centre with its first explorations of ice shelf cavities in West Antarctica. Many more successful missions have proven that under-ice operations are feasible. However, many examples also point out the vast challenges of under-ice robotics and multiple million-dollar vehicles have been lost in action. While many have proven that it can be done successfully, nobody yet has developed under-ice operations into a routine robot deployment – a crucial milestone for sustained robotic exploration of the polar seas.

In the following I want to give an overview about the challenges of position determination in under-ice scenarios:

### **Impermeable ice cover**

As mentioned before, the ice cover itself is a major hindrance. Not only to vehicle deployment, but particularly to vehicle recovery. Cutting deployment holes through the ice is a challenge in its own, so that the hole a vehicle has to return to is typically just a bit larger than itself. This highlights the importance of positioning, as minor errors in position estimation can cause the loss of a vehicle if it does not hit the hole in the ice.

Most subsea vehicles simply jettison their ballast weights in case of a suspected emergency situation. However, surfacing is not a viable emergency strategy underneath ice covers. While locating a dead vehicle underneath the ice and cutting a hole to retrieve it might still be feasible underneath sea ice covers, it is certainly not a possibility under glacial ice cover.

This complication also affects possibilities to deploy acoustic ranging beacons. While drilling through the ice and deploying them from the ice might be feasible in some locations, seafloor transponders for ranging will not be easily recoverable after a mission deployment.

### **Unreliable heading information:**

Positioning by trilateration of acoustic ranges or the determination of vehicle position by range and bearing is not strictly dependent on accurate heading information. However, most survey sensors and particularly any sort of position estimation by dead reckoning are heavily dependent on reliable heading information. This is tricky to achieve in the polar regions due to their vicinity to both, the geomagnetic and the geographic poles.

Depending on the quality of compass sensors, magnetic heading can still be reliable in many polar regions. However, once one gets within 500 nautical miles of the geomagnetic pole, compass heading can start to first drift slowly, then accelerate to drifts beyond 180° within ten minutes, and at last become completely jumpy and erratic. This

can have drastic influence on any automatic vehicle stabilisation or auto-piloting, as well as seriously affect dead reckoning calculations.

Gyro-compasses can provide some relief in these situations, but their precision is also determined by the distance to the geographic pole as the earth rotation axis. Hence they typically only help to stabilise erratic magnetic heading readings, but their inherent strong drift in these regions makes them unreliable as absolute heading source as well. First manufacturers have developed heading sensors which fuse inertial and magnetic readings to achieve better compass stability in these complex scenarios, but there will be a limit to their applicability.

### **Coordinate transforms: everything is moving**

Polar applications are the extreme test scenarios for most positioning software packages. Working in standard UTM zones or geographic coordinates is usually unpractical for the visualisation of positioning at high latitudes. Often, special polar coordinate grids (like the UTM polar cells) are not supported in positioning software and the application of inappropriate coordinate conversions from relative local coordinates can lead to significant distortions or even major software glitches.

This issue is further complicated by the fact, that particularly free drifting ice cover is on the move. Ice floes move with typically 0.1 to 0.5 kn and rotate relative to the world geographic reference system. This has tremendous repercussions on positioning operations: The area of interest can quickly drift out of, e.g., a field with deployed seafloor transponders or even worse, the location of a recovery hole changes continuously. This also affects acoustic positioning beacons deployed through a drifting ice cover. This ice motion can be sensed by arrays of deployed GPS drifters, but a subsea vehicle performing dead reckoning by Doppler velocity log (DVL) against a moving ice floe will likely not correctly predict its geographic position. Particularly, such bottom tracking against moving sea ice can not measure rotational movement of the floe above. This lacking rotational information and the mismatch between inertial sensors (accelerometers and gyroscopes) and DVL tracking against the ice and potentially a seafloor can lead to confusion during the sensor fusion process in dead reckoning estimates of inertial navigation systems (INS). Any such glitch can easily lead to vehicle loss when the vehicle loses good positioning and decreases its chance to get back to its recovery point.

### **Complicated under-ice acoustics**

In a traditional set-up, these shortcomings could easily be overcome by frequent acoustic tracking using LBL (long base line) or USBL (ultra-short base line) acoustic methods. However, the acous-

tic situation under ice can be extremely complex as well.

As a start, ice-covered regions can exhibit a large amount of natural underwater acoustic noise. Be it from crumbling and turning icebergs, movement cracks in glaciers or simply the crunching noises of an ever-moving sea ice cover driven by currents, winds and tides.

This is further complicated by the complexities of sound transmission in the water overall. While polar waters are often extremely clear providing sometimes too few targets for water tracking by DVLs, particularly melting ice can lead to a strongly stratified water column, where large variations in salinity modify sound speed. This can lead to narrow acoustic channels blocking acoustic devices deployed in different depths from communicating with each other. While this might seem beneficial by concentrating acoustic energy to allow longer ranges, it can actually increase acoustic absorption due to frequent interactions with the rough ice cover. Especially for operations close to the sea ice, this surface roughness of the ice underside makes for an extremely difficult situation, as large pressure ridges which easily protrude to depths bigger than 15 m can lead to significant shadowing of acoustic communication lines. Hence, keeping an uninterrupted acoustic tracking by USBL or regular interrogation of a sufficient number of LBL beacons can pose a huge challenge to under-ice positioning.

In a further complication, robotic operations under ice often involve the tracking of vehicles in very shallow tracking angles close to the surface and at large horizontal standoff distances. Often the target of investigation is directly at the underside of the ice, which always results in shallow tracking angles contrary to typical seafloor operations, where positioning systems are optimised for tracking close to the nadir direction. Even for seafloor

investigations, however, complications like the horizontal drifting of sea ice or the impossibility of access to areas underneath ice shelves leads to large horizontal standoff distances between robots and mothership. While many of the acoustic tracking systems claim to operate well with omnidirectional or even toroidal sensitivity, the resulting accuracies at shallow tracking angles can be a severely limiting factor to under-ice operations.

### Deep water

While no ice-covered waters exhibit extreme depths beyond 5500 m, they are certainly too deep to allow vehicle navigation to rely on DVL bottom tracking during entire dives. Simultaneous DVL bottom tracking during under-ice surveying is only available in shallow coastal waters. In deeper waters, robotic vehicles will, however, accumulate a larger position uncertainty during descent if there is no additional support by acoustic tracking.

In summary we see, that the under-ice environment exhibits many challenges that can easily confuse state of the art inertial navigation and positioning systems (see Fig. 1). How these systems handle such mismatches in incoming sensor data becomes crucial for under-ice robotic systems to keep a workable positioning solution. A big challenge remains to build reliable systems that ensure sufficient real-time positioning accuracy that can reliably guide an under-ice robot back to its deployment location and avoid mission failure and vehicle loss. While increasing navigational performance during post-processing is certainly beneficial for survey data processing, it is not sufficient for real-time operations and the challenge of getting a vehicle back in the first place.

Addressing these challenges and mitigating some of the associated risks is crucial for under-ice operations and many different tactics have

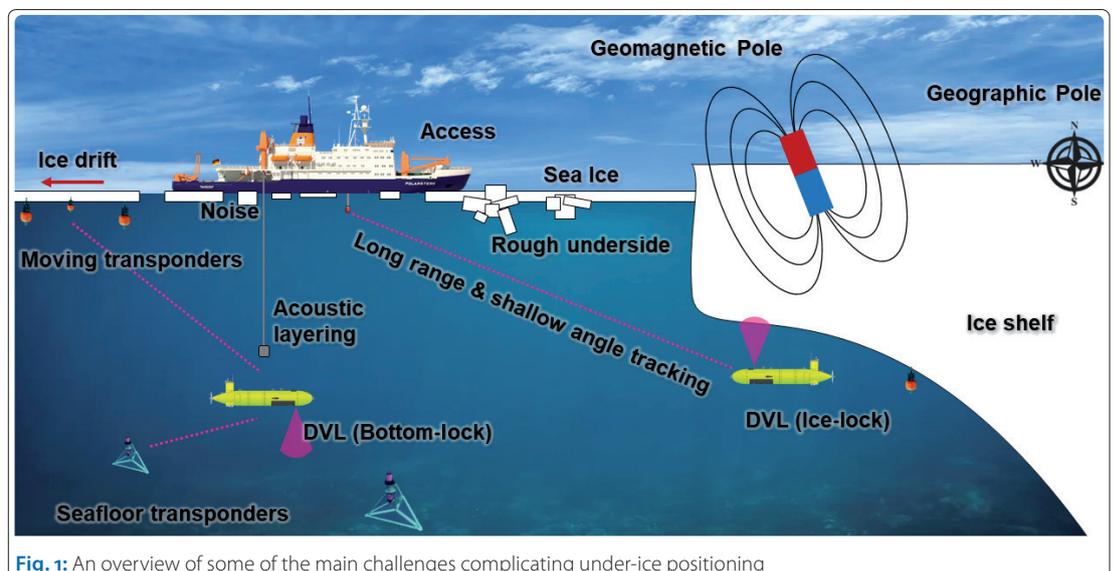


Fig. 1: An overview of some of the main challenges complicating under-ice positioning

been employed to solve these challenges. Unfortunately, most solutions come with high cost and increased system complexity and no single system can address all of them. Luckily, in most situations not all of the previously presented difficulties apply all at once, so that individual solutions suiting most mission profiles can be found. In the following some of the most useful adaptation strategies are discussed:

### Keep things tethered

The most obvious solution to avoid vehicle loss is to keep it physically tethered, so that the vehicle will always be at maximum one tether length away. While coming with its own challenges, like the entanglement of tethers and thruster propellers, this solution is a quick fairly low-cost fix for many small-scale surveying applications. It needs to be noted that adding a tether alone does not provide sufficient protection against vehicle loss, but vehicle buoyancy needs to be considered as well. For a positively buoyant vehicle that has floated up into a heavily deformed sea ice ridge cavity, pulling on the tether might damage the tether and not be helpful for vehicle recovery. In situations like these a slightly negative vehicle trim can help to recover a vehicle by pulling on a tether string. To be fair, we need to acknowledge that probably half of the literature on smaller scale under-ice AUV surveys has been conducted with the safety of a tether – either some kind of rope or high strength multifilament fishing line.

### Fibre optic gyro compasses and high grade INS systems

As mentioned before, heading information is crucial to both the processing of survey data as well as dead reckoning calculations. Some of the limitations of magnetic and gyro compasses can be overcome by fibre optic ring laser gyroscopes, when used in high grade marine inertial navigation systems. These systems have shown to work excellently even at 90° north, but also come with a big associated cost. They typically cost well above 100,000 € and due to their large size they can typically only be incorporated into larger vehicles. In combination with upward looking ice-tracking DVL sensors or traditional DVLs for seafloor missions, these INS can, however, provide the best stand-alone positioning accuracy available for under-ice systems.

### Sparse LBL

Another approach to deal with the complexities of the under-ice acoustic environment with limited acoustic performance, intermittent shadowing of transponders and few attainable positioning pings is sparse LBL, also known as single transponder navigation. In this method, a vehicle merges infor-

mation from the INS with acoustic fixes or ranges to generate an optimal position estimate. The main task of acoustic ranging to known locations in this approach is to constrain INS drift and reduce the size of the error ellipse around an underwater vehicle. When this method combines a high-grade fibre optic gyro INS with high-quality acoustic ranging it results in the highest attainable position accuracy achievable at the moment. However, the associated cost is very high and the complex positioning algorithms need to be robust against potential mismatches of inertial, DVL and ranging information already in-mission and not only during post-processing. This method could be further refined for under-ice applications, by using drifting transponders deployed on the moving ice, which communicate their GPS positions over an acoustic link, so that they can be used for range aiding by the sparse algorithms. Such systems have been demonstrated by scientists at MIT and concepts have been developed by commercial companies, but no supplier is yet offering this capability in his commercial off-the-shelf portfolio.

### Acoustic homing

Acoustic homing has been successfully used by several missions to redirect an AUV to a deployment hole or a docking station. This method is typically based on two or more hydrophones, but sophisticated versions include an inverted USBL transceiver array located in the nose of the vehicle to determine range and bearing to an acoustic transponder. This configuration can achieve longer acoustic ranges but is not commercially available as typical input for INS position estimations. Relying on homing at the end of the mission also has the drawback, that the accumulated position uncertainty during the mission time needs to be smaller than the acoustic range of the homing system. To maximise this distance, these acoustic beacons are often working in the lower frequency range below 15 kHz. While a homing system solves the issue of coming back to the deployment hole with a dedicated piece of hardware, this also comes with added costs and takes up space in the nose of a vehicle, which often is a highly contested area for the location of sensors and recovery mechanisms.

### Adapted diving behaviours

As discussed above, unintended surfacing to the underside of ice has to be avoided for a successful mission. This implies two necessary adaptations for under-ice systems: Firstly they should be equipped with (upward looking) obstacle avoidance. While most AUV can keep a safe distance from the seafloor out of the box, under-ice systems should come with the same function to avoid ice above. The fact that upwards is not necessarily a

safe direction for obstacle avoidance manoeuvres also has to penetrate into all other autonomous vehicle behaviours in such a way that a vehicle either decides if it needs to deviate upwards or downwards, or even rather should turn around on its current track to avoid any collisions. Some vehicles even possess the awareness of being stuck, when inertial measurements do not correspond to the actions of thrusters and control surfaces and can then respond with specialised »get un-stuck« behaviours.

The complexity of the under-ice world should also be reflected in appropriate handling of emergency situations. Dropping a weight and rising to the surface is often a wrong choice under ice, so vehicles should decide to dive back on their previous track out of a danger zone, or wait for operator contact at a predefined emergency loiter location. While dropping of ballast will often result in a vehicle stuck underneath the ice cover, jettisoning buoyancy might be a preferable solution in some scenarios, where a dead vehicle could be more easily recovered from the seabed than from underneath a drifting ice pack.

#### Emergency recovery preparedness

A big factor for de-risking under-ice deployments is the preparedness for emergency recovery situations. Here again positioning plays a crucial role, to determine where a lost vehicle is. This involves having the right acoustic ranging equipment at hand: handheld ranging or USBL transponders, that can be easily transported by sledge, small boat or helicopter are very helpful to locate the hopefully existing independent backup transponders of a vehicle stuck at the ice underside. Once located, it is necessary to have the right drilling and cutting equipment for extracting the vehicle from underneath the ice, or employ a backup ROV system to attach a line and weights to the vehicle. In many cases missions have only been successful because a vehicle considered lost, could be relocated with-

in a short time frame due to a thorough preparation of emergency response actions.

To not frustrate the reader too much about the complexities and problems of under-ice positioning and operations, I want to end this article with a description of three recent successful under-ice deployments and go over the applied methods for under-ice positioning and the most notable special preparations.

#### ROV BEAST on the MOSAiC Drift

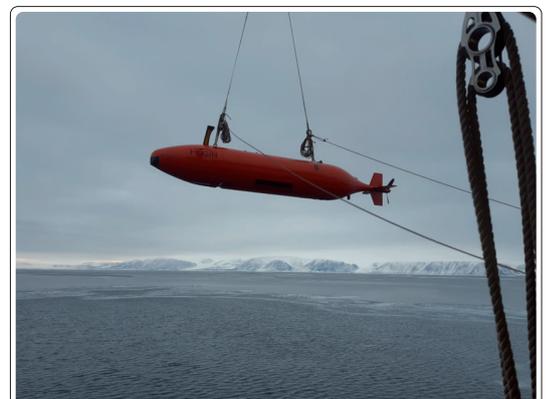
During the MOSAiC Drift expedition from October 2019 to 2020, the Alfred Wegener Institute deployed its large observation-class under-ice ROV nicknamed *Beast* (Ocean Modules M500, see Fig. 2). It carried an extensive sensor suite including upward looking multibeam sonar and was deployed on average twice per week through a hole in the ice floe of the drifting camp. During winter, this hole was covered by a heated tent. Year-round ROV observations were relying on a Linkquest Pinpoint 1000 LBL positioning system with 3 to 6 deployed transponders. Transponders were deployed on 5 m long chains through the drifting ice cover and positions calibrated to a local floe-fixed x/y-coordinate system using measurements from a terrestrial laser scanner. The vicinity of the magnetic pole made vehicle heading information useless most of the time, so that heading information was derived from the filtered acoustic tracking in post processing by ignoring vehicle crabbing angles. Due to the high latitude and glitches in the survey software's coordinate conversions, we had to virtually move the surveys and use »fake« geographic positions centred around 1°N/1°E. As emergency backup, two spare ROVs and plenty of ice drilling equipment were available.

#### Hugin AUV in the North-West Passage

In October 2021 together with University Laval (Quebec City) we conducted two successful



**Fig. 2:** The observation class ROV *Beast* deployed in its ice hole during the polar night of the MOSAiC expedition

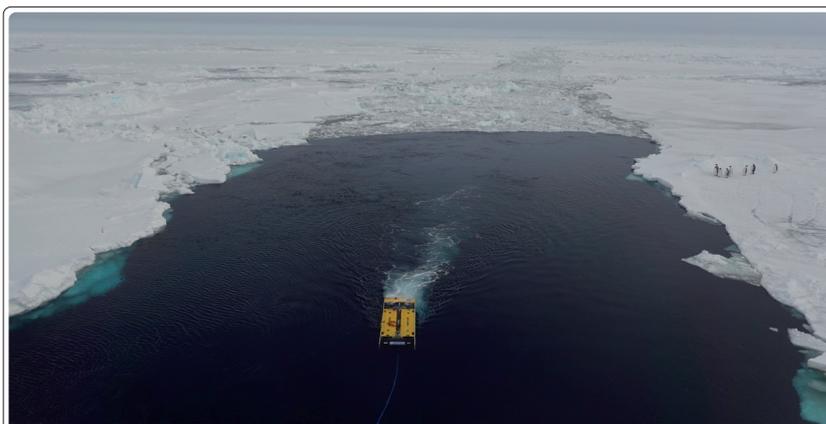


**Fig. 3:** The AUV of Université Laval (Quebec City) during its deployment in the Canadian Arctic off CCGS *Amundsen*

under-ice dives with a recent model of a Kongsberg Hugin 1000 AUV (see Fig. 3). The dives covering several kilometres under a loose and drifting ice pack, were conducted in shallow waters of less than 200 m depth to allow for DVL bottom tracking. Vehicle positioning was further supported by sparse LBL navigation with a single seafloor CNODE transponder and simultaneous tracking with a HiPAP502 USBL mounted on a deployment machine in the hull of research icebreaker *CCGC Amundsen*. The vehicle used its native features of surface avoidance and successfully dodged several thick pieces of ice throughout the dive. A small mini ROV was kept at hand for emergency preparedness, as well as ice drilling equipment.

### The search for the wreck of *Endurance* in the Weddell Sea

In March 2022 a privately funded expedition hired offshore contractor Ocean Infinity, as well as many different support companies including ice information provider Drift & Noise Polar Services and scientists from the Alfred Wegener Institute. The successful search for the wreck was conducted with two SAAB Sabretooth hybrid vehicles (see Fig. 4). These are autonomous vehicles with up to 13 km of fiber-optic cable tether, that allowed live operator control and intervention during the dives. Survey-grade under-ice positioning at the seafloor in 3000 m depth was achieved by DVL bottom track aided inertial navigation additionally supported by long-range USBL tracking using a Sonardyne Ranger 2 low-frequency GyroUSBL deployed through the ship's moon pool. Vehicle deployments were aided by a team of experts on board, providing real-time ice drift forecasting and analysis of high-resolution radar satellite images. Emergency preparedness included a second vehicle equipped with a manipulator arm, as well as handheld dunking transceivers.



**Fig. 4:** A SAAB-Sabretooth hybrid vehicle during recovery after a dive under the sea ice during the Endurance22 expedition to the Weddell Sea

These three examples show, how successful ice operations can be conducted, if the right strategies are applied to the particular limitations of the mission at hand. Plenty of examples, however, demonstrate that ignorance of the complexity of under-ice operations and the lack of special precautions can lead to failed missions and expensive vehicle losses.

For the future, under-ice robotic exploration can hopefully be made a regular activity, as every mission contributes to the advancement in technology robustness. The market of consumer quadcopters has shown in an impressive way how changing the scale of the vehicle fleet has led to quantum leaps in vehicle capabilities. As currently most strategies to improve under-ice operations involve high equipment costs, a critical prerequisite to regular under-ice missions is to lower the cost of systems and improve the development of low-cost solutions. A second priority comes to improved acoustic positioning capabilities, particularly at shallow tracking angles and large standoff distances in the complicated under-ice environment. //

# Subsea positioning using camera systems

An article by MERLIJN VAN DEEN

Determining the position of structures (assets) on the seabed accurately and robustly is challenging. Typically used land-based techniques such as satellite-based positioning are not available subsea due to the attenuation of radio waves in water. Visual navigation is challenging due to the lack of natural light and limited visibility. Conventional subsea positioning therefore uses acoustic techniques such as long baseline (LBL) or ultra-short baseline (USBL) positioning, with an acoustic beacon mounted on the asset. The high pressure at depth means that this hardware is heavy, bulky and expensive. Furthermore, removing the beacon after the asset was installed adds risks and complexity to the asset positioning process. To reduce the risk in subsea asset installations, Fugro developed a touchless, camera-based approach to subsea positioning: QuickVision. By combining an accurate camera system with calibrated pattern targets, this unique approach enables quicker and safer operations in a difficult environment.

QuickVision | camera system | structure from motion – SfM | V-SLAM | intelligent camera  
QuickVision | Kamerasystem | Structure-from-Motion – SfM | V-SLAM | intelligente Kamera

Die genaue und zuverlässige Bestimmung der Position von Strukturen (Anlagen) auf dem Meeresboden ist eine Herausforderung. Typische landgestützte Verfahren wie die satellitengestützte Ortung sind aufgrund der Dämpfung von Funkwellen unter Wasser nicht verfügbar. Die visuelle Navigation ist aufgrund des fehlenden natürlichen Lichts und der eingeschränkten Sicht schwierig. Für die herkömmliche Unter-Wasser-Ortung werden daher akustische Verfahren wie die Long-Baseline-Ortnug (LBL) oder Ultra-Short-Baseline-Ortung (USBL) eingesetzt, bei der eine akustische Bake am Objekt angebracht wird. Aufgrund des hohen Drucks in der Tiefe ist diese Hardware schwer, sperrig und teuer. Darüber hinaus birgt das Entfernen der Bake nach der Installation der Anlage zusätzliche Risiken und macht das Verfahren zur Positionierung der Anlage komplizierter. Um das Risiko bei der Installation von Unter-Wasser-Anlagen zu verringern, hat Fugro einen berührungslosen, kamerabasierten Ansatz zur Unter-Wasser-Positionierung entwickelt: QuickVision. Durch die Kombination eines präzisen Kamerasystems mit kalibrierten Zielmustern ermöglicht dieser einzigartige Ansatz einen schnelleren und sichereren Betrieb in einer schwierigen Umgebung.

## Author

Merlijn van Deen is Agile Product Owner Vision at Fugro in the Netherlands.

[m.vandeen@fugro.com](mailto:m.vandeen@fugro.com)

## Introduction

The accurate positioning of subsea assets is a critical component of subsea installations. The conventional technique is to temporarily mount survey and ancillary equipment on the asset during the positioning phase of the work, such as long baseline (LBL) acoustic beacons, fibre optic gyros (FOGs) and associated cabling and battery packs. This equipment allows the real-time positioning of the assets via mature acoustic survey techniques. Nevertheless, the installation, configuration and maintenance of this type of equipment takes time and adds a degree of complexity. It also presents an operational health and safety risk due to the weight of the equipment and the use of battery packs in sealed housings.

To remove the necessity to temporarily mount, and subsequently remove, survey equipment on an asset to be positioned subsea, we developed and patented a touchless, camera-based approach

to subsea positioning: Fugro QuickVision®. QuickVision consists of a small, calibrated machine-vision subsea camera which can be mobilised onto any remotely operated vehicle (ROV), and a software solution running on a surface vessel. This is often combined with a unique coded pattern which is attached to the asset. Combined, these components allow QuickVision to accurately determine the asset's position and orientation in real-time.

In this article, we will discuss the development of QuickVision and will highlight the advantages the system provides over contemporary systems and techniques through three use cases. Finally, we discuss the future of cameras in subsea survey operations.

## Subsea camera systems

Conventional ROV cameras, built for piloting and inspection, generally do not have the attributes to be part of a camera-based survey system. For ex-

ample, a zoom lens under pilot control limits the ability to accurately calibrate the lens, and high frame rates and short shutter times come at the cost of increased noise in images. Issues such as these limit what can be achieved with conventional camera systems from a survey perspective.

In 2015, we therefore started development on an in-house designed and fabricated subsea camera system (Fig. 1), to be used as the key component in a touchless, vision-based, subsea survey system. This camera system combines three attributes that are vital for accurate measurements:

First, a light-sensitive camera module which provides access to unprocessed and uncompressed images. By using a modern machine vision camera module, we gain access unprocessed and uncompressed («raw») imagery. To increase light-sensitivity, we chose a module with a physically large sensor and moderate spatial resolution. We are thus able to acquire quality imagery suitable for use in both the QuickVision toolset and for use in third party offline photogrammetry suites.

Second, the use of a fixed zoom (prime), fixed aperture and fixed focus lens. A fully manual lens, combined with a hemispherical porthole allows for an accurate in-water calibration procedure to be undertaken at the time of manufacture.

Finally, an accurate timestamping approach. The vast majority of subsea camera systems do not support accurate timestamping of imagery. By using a triggerable machine vision camera module and accurate triggering hardware, our camera system can timestamp images to sub-millisecond precision. We are then able to synchronise images with all other ROV sensor data, allowing us to perform measurements in even the most dynamic scenarios.

## Starfix navigation software

The design and fabrication of a calibrated subsea camera system with the attributes to allow the

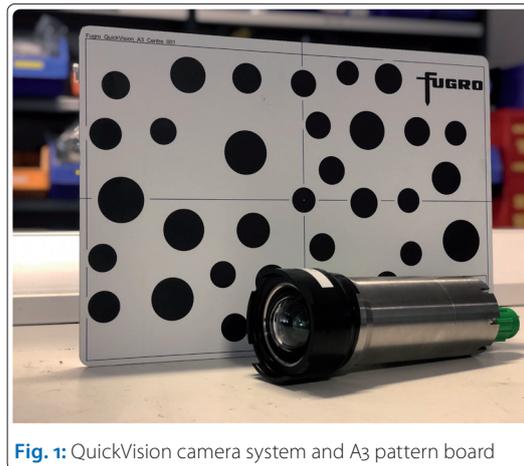


Fig. 1: QuickVision camera system and A3 pattern board

camera to form part of a robust and accurate subsea survey technique is only part of the challenge. Whilst such a camera system acquires high-quality and accurately timestamped imagery, these images must be processed and combined with a great deal of ancillary data to allow subsea survey to be undertaken.

We extended Fugro's online navigation suite Starfix with a QuickVision module to allow imagery to be used as the basis for real-time surveying. This module combines the timestamped images with the lens calibration model, descriptions of the QuickVision patterns and how they are mounted on assets, and the position and orientation of the camera system on the ROV into a positioning result relative to the ROV. This relative result is then combined with the position and orientation of the ROV, which are computed based on the ROV's navigational systems such as LBL and FOG.

The results of the computation can be displayed in Starfix using a variety of methods, for example through numerical overlays, time-series plots, and two- or three-dimensional maps (Fig. 2).

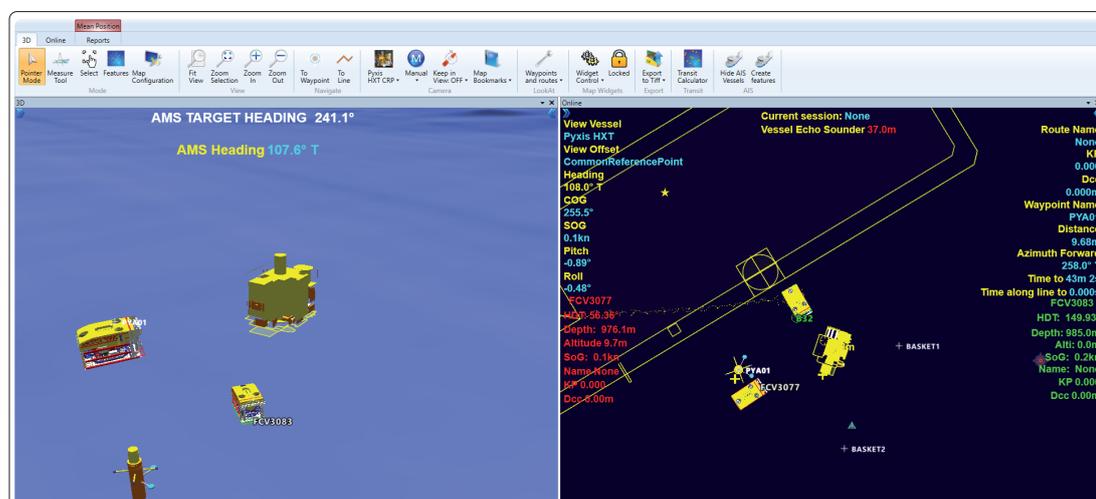


Fig. 2: Real-time numerical and graphical displays in Starfix. A 3D representation of two ROVs and the subsea structure (left). A 2D surveyor map with overlaid numerics used to precisely monitor the positioning of the asset (right)

## Patterns

The most used tool within the QuickVision module is Fugro's patented dot-based positioning system QuickVision Tracking. This tool uses calibrated pattern boards (Fig. 1) mounted onto the structure to be positioned. Each pattern has a unique layout of dots, which allows QuickVision Tracking to recognise each individual pattern and to distinguish different patterns from each other.

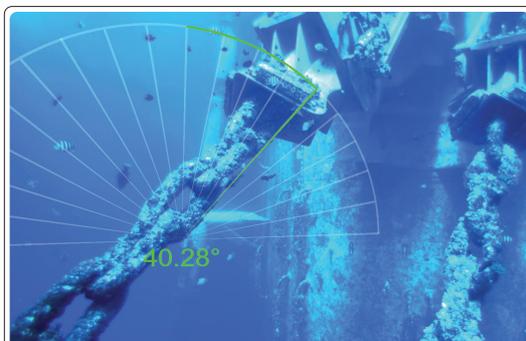
During preparations for subsea operations, the survey team will mount one or more dotted patterns onto the asset to be positioned. The patterns can be installed on any flat or cylindrical surface, and the size of the pattern boards can be optimised for each project. For example, we generally use smaller (A3 or A4) patterns for subsea installations, and larger (1 m × 1 m) patterns for monopile foundation installations.

The position and orientation of these patterns with respect to the structure is then determined using conventional dimensional control techniques such as total station and steel tape measurements. This can be done early in the project scope, even before the structure leaves the fabrication yard.

During the positioning phase, the solution tracks the patterns automatically and in real-time. The position and orientation of the asset is then computed using the dimensional control results and the ROV positioning information. This can be done in either a local or a geo-referenced coordinate system.

## Example use cases

In this section, we will detail three projects where we used QuickVision rather than conventional survey techniques. First, we'll discuss the use of the virtual inclinometer to take anchor chain inclination measurements for a floating production storage and offloading unit (FPSO). Second, we'll discuss how patterns were used in the installation of a horizontal christmas tree (HXT) on top of a well-



**Fig. 3:** Virtual inclinometer measuring the inclination of an anchor chain. This measurement is combined with a measurement taken at a perpendicular heading. Combined, these measurements allow us to derive the inclination of the anchor chain

head. Finally, we'll show how patterns were used in the installation of torpedo pile anchors.

## Anchor chain inclination measurements

The first example is the measurement of inclination along an anchor chain. Many floating offshore structures, such as floating wind turbines and FPSOs, are (semi)permanently anchored to the seabed. As part of the installation of the structure, the anchor chains must be tensioned to the correct tension. During the lifetime of the structure, inspections are performed to verify that the mooring tension is still within specification. In both cases, the tension in the mooring chain is computed using a catenary model. One of the inputs to this model is the inclination angle of the chain at different points along the chain.

The conventional approach to measuring the inclination is to physically place a tilt sensor on a chain link. This requires cleaning the link from any marine growth, a time-consuming process. In addition, care must be taken while placing the sensor to allow for highly accurate measurements.

In contrast, the QuickVision camera system can be used to take this measurement without physical contact with the chain. Using the virtual inclinometer tool, we measure the chain angle (Fig. 3) from two perpendicular headings. These two measurements, combined with the synchronised heading data from the ROV, allow us to calculate both the inclination angle and inclination direction. To further improve accuracy and robustness, additional measurements can be taken at intermediary headings.

## Orientation monitoring

The second example is the installation of a horizontal christmas tree (HXT) on top of a wellhead. An HXT forms the connection between an oil well and a jumper or flowline transporting the oil or gas. To be able to connect this jumper, the HXT must be placed with the correct orientation.

Conventionally, the heading of the HXT would be measured using expensive, bulky and battery-operated equipment such as a subsea gyro and an acoustic modem or visual display. A gyro allows for very accurate measurements, but removing the equipment from the HXT after the installation adds significant risk to the operation. In addition, if a sensor or battery malfunctions, replacing it offshore can be a time-consuming and costly operation.

For this project, we opted for patterns mounted onto the asset. As the pattern boards are inexpensive, we can easily place multiple pattern boards – in this case four – and can leave them in place after installation. The patterns were mounted and dimensionally controlled outside of the project critical path, further reducing project risk.

After the patterns were installed and dimensionally controlled, and the system was configured, the QuickVision system automatically detects the patterns when they come into view, and switches between patterns when required. For each detected pattern, the relative position and orientation with respect to the camera is computed. This information is then combined with the ROV navigation data to compute the HXT's heading (Fig. 4).

### Torpedo pile anchors

The last example is the positioning of torpedo pile anchors. Torpedo piles are deep-water dynamically installed anchors. These piles, weighing up to 200 tonnes, are embedded into the seabed by free-fall. They are typically dropped from 30 to 100 metres above the seabed. Before they are dropped, they need to be accurately positioned above the target location.

As it is not feasible to mount equipment on the piles, the conventional method to position the piles is to physically touch them with the ROV. Despite this being an effective method, it does introduce unnecessary risk to the ROV.

As with the previous example, we chose to use sacrificial patterns to allow for a fully touchless solution. In this case, we used stickers rather than rigid pattern boards as this simplified the installation on the cylindrical surface of the pile. Once the patterns were detected, QuickVision could compute the pile position relative to the camera. Combined with the ROV's positioning system, Starfix could then compute the georeferenced position of the pile. Through this method, we were able to position all piles safely and well within tolerance.

### The future of subsea cameras

The original QuickVision solution was built around 2015. Over the last eight years, technology has progressed significantly: The increase in computing power on computers and graphics cards over the last decade have opened a wide array of opportunities for computer vision, and improvements in camera technology have led to larger and more light-sensitive camera modules.

In this section, we will discuss two areas where this progress can be seen in subsea camera-based survey: structure from motion, reconstructing 3D models from images, and intelligent cameras, which can process images subsea in real time.

#### Structure from motion

Structure from motion (SfM), also often called photogrammetry or visual simultaneous localisation and mapping (V-SLAM), is a computer vision methodology to build 3D point clouds based on image data. SfM algorithms detect key features in images, match these features between images, and uses this information to build a three-dimen-

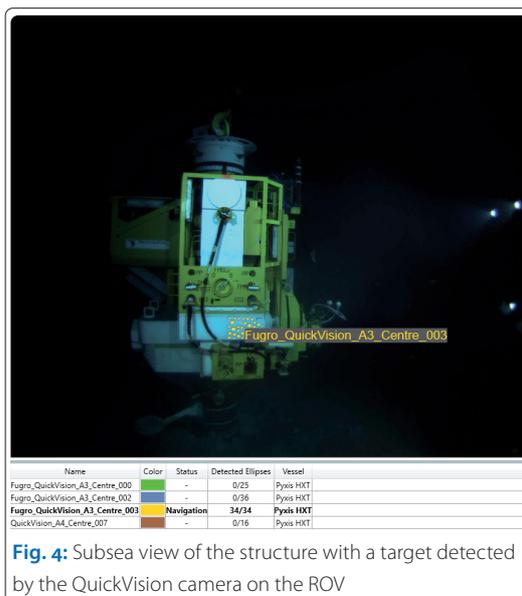


Fig. 4: Subsea view of the structure with a target detected by the QuickVision camera on the ROV

sional model of the environment. By providing the algorithm with external scale information (e.g., through a calibrated scale bar) or positioning information (e.g., through the ROV navigation system), it becomes possible to generate a correctly scaled and georeferenced point cloud.

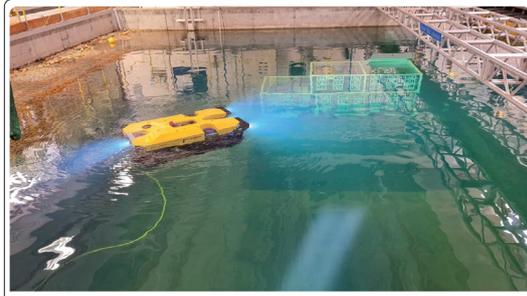
An advantage over conventional techniques such as multibeam sounding and laser scanners is a decreased dependence on accurate positioning throughout the process. Instead, the SfM system can provide positioning information by detecting earlier seen features (loop closure). As such, it becomes possible to run surveys with limited (e.g., just USBL) or no positioning information at all.

We've successfully used SfM for a variety of projects, ranging from subsea metrology projects to benthic surveys. Although often a full 3D model is not required for the immediate deliverables, having the model provides significant flexibility, such as the opportunity to take measurements that were not planned as part of the project scope.

#### Intelligent cameras

The increased computational capacity of low-power devices has made it possible to embed powerful computers in a subsea housing next to the camera. This allows for much simpler interfacing on an ROV, and also allows low-latency integration of image data into an ROV control system.

One example of this is our second generation QuickVision camera, which runs part of the computer vision algorithms in the camera housing. This simplified interfacing the camera significantly: for example, we no longer require a gigabit Ethernet channel to interface the camera system. An additional benefit is that the camera can run in »standalone« mode, without topside computer, which allows for operation from autonomous underwater vehicles (AUVs).



**Fig. 5:** Fugro Blue Volta electric ROV trial using the National Robotarium camera system

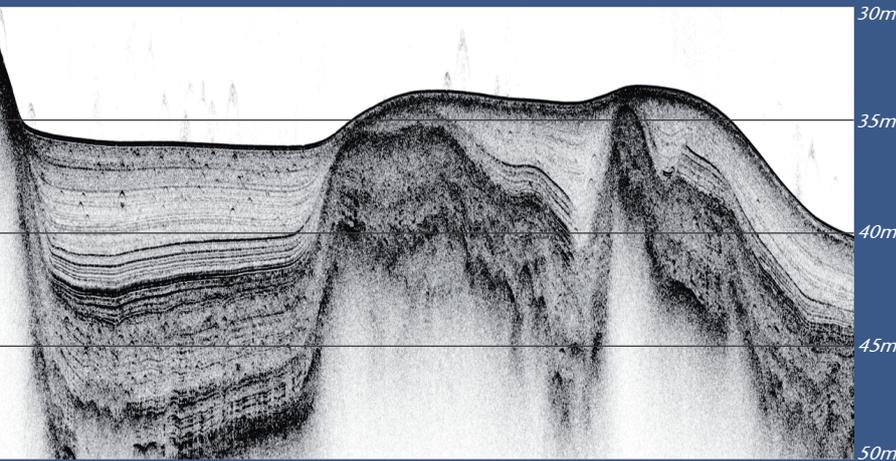
A second example is the real-time V-SLAM camera design by the UK's National Robotarium. Fugro has partnered with the institute around the common interest in autonomous ROVs. The National Robotarium has designed a camera system which is able to build a real-time three-dimensional picture of the environment. Through this digital twin of the environment, it becomes possible to autonomously navigate the ROV

within that environment. We are currently in the process of integrating this camera system on our Blue Volta line of ROVs (Fig. 5), which are launched from our Blue Essence Uncrewed Surface Vessels (USVs) and are controlled from a remote operations centre (ROC).

### Conclusion

The ability to determine the position of structures (assets) on the seabed accurately and robustly is challenging. In this article, we have shown that an integrated camera-based survey solution makes it possible to position assets without the need for mounting and removing bulky, heavy, and expensive equipment. Developing this solution required an integrated approach, combining a subsea camera system designed for survey applications with an integrated navigation solution and a patented pattern navigation system. The combination allows us to position subsea assets accurately and safely, accelerating project delivery, increasing health and safety performance. //

www.innomar.com



Data Example from a Norwegian Fjord (Innomar "standard" SBP, 10kHz)

## Innomar Parametric Sub-Bottom Profilers

- ▶ Discover sub-seafloor structures and buried objects
- ▶ Acquire unmatched hi-res sub-seabed data with excellent penetration
- ▶ Cover all depth ranges from less than one meter to full ocean depth
- ▶ Highly portable equipment for fast and easy mobilisation
- ▶ User-friendly data acquisition and post-processing software
- ▶ Used worldwide for various applications by industry, authorities, science

### ▶ Shallow-Water Solutions



### ▶ High-Power Solutions



### ▶ Remotely Operated Solutions



**Innomar**



# Autonomy enables German survey companies to leverage opportunities from offshore wind

An article by SÖREN THEMANN and DANIEL ESSER

In the next few years, a lot of work awaits hydrographers in connection with offshore wind. But resources are limited. Therefore, more autonomy and digitalisation must enter the surveying practice. Autonomous platforms such as uncrewed surface vessels (USVs) with intelligent multibeam systems can collect data faster. Meanwhile, experts can take care of multiple projects at the same time and deal with the really tough decisions they are trained to make.

autonomy level | Autonomy Engine | Mantas T12 | USV | Survey-as-a-Service | offshore wind  
Autonomiegrad | Autonomy Engine | Mantas T12 | USV | Vermessung als Dienstleistung | Offshore-Wind

In den nächsten Jahren wartet viel Arbeit auf Hydrographen im Zusammenhang mit Offshore-Wind. Doch die Ressourcen sind begrenzt. Daher müssen mehr Autonomie und Digitalisierung in die Vermessungspraxis einziehen. Mit autonomen Plattformen wie besatzungslosen Oberflächenfahrzeugen (USV) mit intelligenten Fächerecholoten können Daten schneller erfasst werden. Währenddessen können sich die Experten um mehrere Projekte gleichzeitig kümmern und sich mit den wirklich schwierigen Entscheidungen beschäftigen, für die sie ausgebildet sind.

In February 2023, the German government launched a tender related to four »un-surveyed« areas in the North Sea and the Baltic Sea with a combined offshore wind capacity of 7 GW. The immediate effect of this is clear – more work will be available for German hydrographers and their marine survey company employers. Not just for the initial campaigns but for countless surveys over many decades, as the wind farms and subsea infrastructure are planned, built, operated and finally decommissioned.

While positive news for the marine survey sector in Germany, it's only part of the story. More tenders will come as the government seeks to unlock the offshore wind production targets set in last year's so-called »Easter package«, which opened the door for significantly more wind energy production capacity. All new development areas will require the same levels of up-to-date hydrographic data over many years. This leads us to ask, are we as an industry ready to deal with the surge in demand coming from offshore wind? Are there enough of us with the knowledge and expertise offshore wind needs? And what can we do if demand outstrips supply?

Like any country, hydrography is a niche sector in Germany, and we have a finite pool of skills to go around. All clients, including wind farm owners/operators and their engineering contractors,

will need to book their data acquisition campaigns further in advance than they would before. But as we know, due to everything from the weather and licensing problems to the availability of equipment and skills, it's the dynamic factors that decide if a survey will even happen when planned, let alone produce the desired data successfully.

## Making the most of your resources

At least one of these issues – the availability of skilled surveyors – can be addressed by implementing more autonomy into the marine survey workflow, with the result being that data can be acquired much faster and therefore the needs of more clients can be addressed. Instead of managing the output of a single survey package on a single survey boat, autonomous platforms present the opportunity for marine surveyors to oversee multiple independent or connected platforms and in doing so, massively increase the amount of data they are responsible for.

Of course, marine surveys using uncrewed surface vessels (USV) are already happening. But with increased autonomy levels it's possible to reduce the number of human touchpoints required, making it safe for a single skilled surveyor to oversee the output and operation of two autonomous platforms working on the same project – doubling

## Authors

Sören Themann is CEO, Daniel Esser is co-owner and Director Business Development at Subsea Europe Services GmbH in Halstenbek.

[s.themann@subsea-europe.com](mailto:s.themann@subsea-europe.com)

Autonomy Levels	Level 0 - No Autonomy	Level 1 - Operator Assistance	Level 2 - Partial Autonomy	Level 3 - Conditional Autonomy	Level 4 - High Autonomy	Level 5 - Full Autonomy
Vessel	Crew control everything	Most functions controlled by crew but some can be done automatically by the vessel	At least 2 critical functions are automated such as speed and heading (usually via autopilot), but the crew must be ready to take instant control.	Crew still necessary, but not required to monitor the situation continuously.	Vessel performs safety-critical operations for the entire voyage, human override is still an option.	Vessel performs all tasks under all conditions. No human attention or interaction required
Sensor	Surveyor controls everything	Most functions controlled by surveyor but some can be done automatically by the sensor.	At least 2 critical functions are automated (like range and gate track), but the surveyor must be ready to take control	Sensor performs critical functions automated (range, gate, swath, power). Surveyor still necessary, but not required to monitor sensor all the time.	Sensor performs all functions automated, human override is still an option.	Sensor performs all survey tasks under all conditions. No human attention or interaction required!
Survey system	Captain and Surveyor control everything.	Most functions controlled by captain and surveyor but some can be done automatically by ship and sensor (independently).	At least 2 critical functions are automated for both, ship and sensor (still independently).	Survey System (ship + sensor) are loosely coupled and perform critical functions as a coupled system.	Survey System (ship + sensor) are tightly coupled and perform all functions as an integrated system, human override is still an option.	Survey System (ship + sensor) are tightly coupled and perform all functions as an integrated system. No human attention or interaction required.

Fig. 1: This table shows the various levels of autonomy with the red boxes denoting the development path for realising true autonomy for marine survey

the amount of data acquired when compared to traditional marine survey practices.

The approach puts no extra pressure on marine surveyors and support staff. In fact, the automation of many factors makes the job less demanding while being more rewarding, as professionals still get to exercise their training and judgement whilst delivering even more value for their employers and clients. According to the intelligence of an autonomous platform or hydroacoustic package, it is possible that marine surveyors could oversee even more USVs simultaneously as a »swarm« at an individual location from a mothership or split across different projects geographically, from an operations and control centre ashore.

There is still work to be done to get to this point, but improving the autonomy level for marine sur-

vey platforms and sensors will result in much more intelligent systems (Fig. 1).

### Sensors are getting more intelligent

In order to get to »True Autonomy«, where USVs and USV swarms can operate with fewer humans in the loop, there is still work to be done on autonomy controller technology – the »Autonomy Engine«; an AI-powered »brain« that ensures safe and effective mission planning, navigation, obstacle avoidance and self-directed decision making.

Central to this is the integration of more intelligent multibeam systems that can process acquired data on board and together with the Autonomy Engine, enable independent operation based on real-time data. Subsea Europe Services focuses the efforts of its R&D centre (Fig. 2) at the Ocean Technology Campus Rostock on integrating these technologies and the required software development; with the goal of improving data acquisition and on-board processing for boosting the capabilities of today’s autonomous platforms.

Further, new generation multibeam systems will include the ability to acquire data at greater speed – IHO Executive Order at up to 20 knots even (of course depending on water depth), which makes them ideal for use on smaller, more agile USVs like Subsea Europe Services’ 12 ft long »Autonomous Surveyor«, a Mantas T12 model from US manufacturer Maritime Tactical Systems Inc., MARTAC (Fig. 3). With multibeam systems capable of data acquisition at up to 20 knots, a single Mantas T12 has the potential to collect five times as much data in the same timescale as is possible today. The difference is exponential – scaling two platforms results in 10 times as much data, and so on.

Reducing the cost of data depends heavily on optimising the man-machine-ratio, which in turn,



Fig. 2: Subsea Europe Services conducts its R&D work from a new facility at the Ocean Technology Campus Rostock



**Fig. 3:** The »Autonomous Surveyor« USV is ready to deliver high-speed hydrographic surveying as soon as new multibeam systems are available to provide this functionality

demands the application of even more intelligent autonomous decision-making intelligence. Currently, the company's »Survey-as-a-Service« offering has a man-machine-ratio of 1:2, but Autonomy Engine and project workflow automation developments in the pipeline are expected to make it possible for a single operator to manage even more systems concurrently. Subsea Europe Services is aiming towards autonomy levels 4 and 5 in the next 18 months, which is complete automation of platform and payload for 80 % of survey time.

The Autonomous Surveyor will be able to leverage the capabilities of the next generation of multibeam systems as soon as they are available, as it is already one of the fastest and most agile offshore-capable marine survey platforms available today.

### Digital workflows help to manage the data

Subsea Europe Services' R&D track also connects the acquisition of bathymetric data to subsequent data management, processing and delivery. The company's mission to simplify marine data acquisition by providing clients with truly autonomous survey systems that deliver high-quality data at extremely low operational costs and do not require large operations centres to scale, is completed with the addition of digital data management in the Cloud, which also opens up the ability to offer »Data-as-a-Service«.

The rationale is simple; once the acquired hydrographic data is digitalised, its management

and processing can be easily automated. The time and cost savings of reduced human interaction at this stage can be added to efficiencies that Subsea Europe Services is creating during data acquisition that have the potential to reduce the marginal cost of data to game-changing levels.

Moving marine surveyors to motherships (Fig. 4) and shore-based control centres for the management and oversight of autonomous survey platforms reduces operational expenditure massively but not because it is cutting jobs. It's



**Fig. 4:** A central mothership can be used to manage a single USV or a swarm consisting multiple survey platforms

a change in thinking in how marine surveys are carried out but skills and experience are still required. The objective is to leverage more from the available resources as demand for marine data grows in line with offshore wind development. There won't be enough surveyors to go around, so the autonomous platforms will fill the gap and make the industry more profitable and sustainable.

There are further savings to be made elsewhere. Autonomous craft are less expensive to build than crewed platforms that must cater for the humans on board. They are smaller, more agile and easier to maintain. And due to more favourable economics, they can easily take advantage of innovative electric propulsion solutions, which can reduce fuel costs and be 100 % carbon neutral (if batteries are charged using renewable energy sources).

Subsea Europe Services' mission to chain the data acquisition efficiencies of True Autonomy at sea to the significant marine survey workflow advantages unlocked by Cloud data management are already well advanced. The company is using the TrueOcean Marine Data Platform to manage data from the Autonomous Surveyor regularly and while today it is mostly data acquired during trials of new autonomy controller software or workflow automation, the ability to share data in a single platform on the cloud will provide value for commercial clients.

Overall, autonomous operations and digital data management have the potential to complement and enhance the work of skilled workers, rather than replace them entirely, by allowing them to focus on more complex and higher-value tasks while reducing the burden of repetitive and time-consuming work. //

---

## Die nächsten Schwerpunktthemen

- HN 126 (Oktober 2023)      **BIM und Digitale Zwillinge**
- HN 127 (Februar 2024)      **Ozeandekade**
- HN 128 (Juni 2024)      **Munition im Meer**



# True Autonomy

Work smarter. Work faster.

**Optimise** your marine survey and underwater inspection projects with innovative new **autonomous solutions**

The Subsea Europe Services autonomous fleet serves a dual purpose to generate efficiency for our clients in commercial survey operations and support our R&D team to develop new technology, integrations and workflows that will further simplify and reduce the costs of marine data acquisition.

**Seamlessly integrate autonomous surface & subsea platforms to unlock new efficiencies for marine surveyors in the field**

- Easily extend your daily survey line capacity to acquire more, better-quality data
- Simplified management offering launch and leave capabilities
- 'Survey-as-a-Service': Low initial outlay for fast mission turnaround



SUBSEA EUROPE  
**SERVICES**

Consulting



# Ocean engineering from space into depth

Realise your projects in cooperation with our hydrographic services

**CTDs & SVPs**



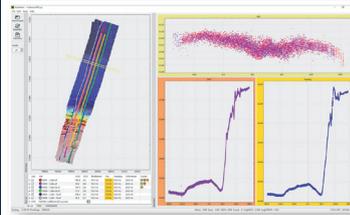
Our hydrography engineers are happy to develop systems tailored exactly to your needs and to provide professional advice and support for setting up your systems and training your staff.

MacArtney Germany benefits from being part of the MacArtney Group and enjoys unlimited access to cutting-edge engineering competences and advanced facilities.

**Acoustic sensors**



**Software**



**Position and motion sensors**



**Integration**

