

# HydrOs

## Ein integriertes Ortungssystem kombiniert mit hydrologischen Daten

Ein Beitrag von HARRY WIRTH, MARC BREITENFELD, ANNETTE SCHEIDER und VOLKER SCHWIEGER

Auf Bundeswasserstraßen (BWaStr) werden heute fast ausschließlich Globale Navigations satellitensysteme (GNSS) für die hochpräzise Ortung von Peilschiffen eingesetzt. In Gebieten unterhalb von Brücken, in extremen Tallagen oder bei starkem Uferbewuchs und ufernahen Gebäuden ist eine Ortung oft nicht möglich bzw. das Ergebnis zu ungenau. Zur Genauigkeitssteigerung, der Erhöhung der Verfügbarkeit und der Zuverlässigkeit bei der Gewinnung von Geometriedaten des Gewässerbetts der BWaStr und zur wirtschaftlicheren Aufgabenerledigung hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) daher in Kooperation mit dem Institut für Ingenieurgeodäsie der Universität Stuttgart (IIGS) ein integriertes hydrographisches Ortungssystem (HydrOs) entwickelt.

### Autoren

Harry Wirth ist Ansprechpartner für Gewässervermessung im Referat Geodäsie der Bundesanstalt für Gewässerkunde. Marc Breitenfeld arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter im selben Aufgabengebiet. Prof. Dr. Volker Schwieger ist Leiter des Instituts für Ingenieurgeodäsie der Universität Stuttgart. Annette Scheider ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am selben Institut

wirth@bafg.de  
breitenfeld@bafg.de  
annette.scheider@  
ingeo.uni-stuttgart.de  
volker.schwieger@  
ingeo.uni-stuttgart.de

HydrOs | GNSS | Erweitertes Kalman Filter | RTS-Algorithmus | Tachymeter | Ausreißertest

### 1 Einleitung

In der Praxis müssen GNSS-Ausfälle durch personalintensive Erfassungs- und Auswertemethoden kompensiert werden. Insbesondere in GNSS-abgeschatteten Bereichen muss im Binnenbereich auf landgestützte Ortungssysteme ausgewichen werden. Manuelle Auswertemethoden liefern oft subjektiv beeinflusste oder fehlerhafte Ergebnisse.

Im Rahmen der Entwicklung sollten daher folgende Anforderungen erfüllt werden:

- Die Verfügbarkeit der Ortung soll in den empfangskritischen Bereichen erhöht werden.
- Die Auswertung soll effektiver und effizienter werden.
- Der Anwender soll zuverlässige Integritätsinformation (Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse, verringerte Genauigkeit oder Ausfall von Komponenten) erhalten.
- Auch nach Verlust der GNSS-Mehrdeutigkeiten wird angestrebt, folgende Genauigkeiten mit 95 % Sicherheitswahrscheinlichkeit über einen Zeitraum von bis zu 60 Sekunden einzuhalten:
  - Lage-Ortungsunsicherheit von maximal 30 cm in beiden Koordinatenkomponenten,
  - Höhenmessunsicherheit von maximal 10 cm.

### 2 Das Systemkonzept

Ein einzelner Ortungssensor kann in den meisten Fällen in Bezug auf Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Genauigkeit keine optimale Lösung liefern (Hentschinski u. Wirth 2012). Aus diesem Grund wurde für folgende Sensoren und Informationen, die sich im Falle eines Ausfalls gegenseitig stützen können, die Integration in ein Multi-Sensor-System untersucht:

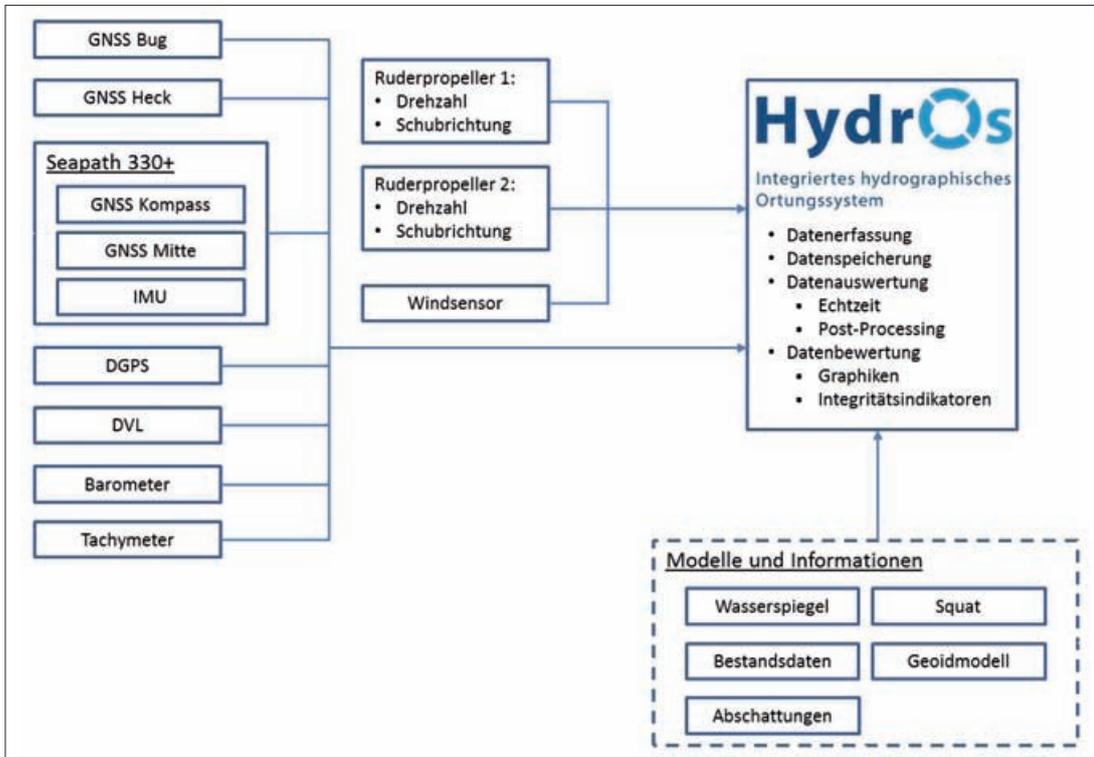
- *GNSS-Empfänger* zur Messung von Lagekoordinaten, Höhen, Geschwindigkeiten über Grund sowie Kurs über Grund,

- *DGPS-Empfänger* zur Messung von Lagekoordinaten, Geschwindigkeiten über Grund und Kurs über Grund,
- ein *Kompass* zur Messung einer Orientierung bezogen auf den geographischen Nordpol,
- eine *Inertial Measurement Unit (IMU)* zur Messung von Drehraten, Geschwindigkeiten über Grund, Orientierungswinkel und Hub,
- ein *Doppler Velocity Log (DVL)* zur Messung von Geschwindigkeiten über Grund sowie Geschwindigkeiten durchs Wasser,
- *Sensoren zum Abgriff der Schraubendrehzahl und Schubrichtung* von bis zu zwei Ruderpropellern,
- ein *Windsensor* zur Messung von relativen Windrichtungen und -geschwindigkeiten,
- ein *Tachymeter* zur Bestimmung des Koordinatenoffsets zwischen einem Referenzpunkt auf dem Schiff und einem bekannten Festpunkt. Als Messgrößen wurden dabei die Horizontalrichtung, die Vertikalrichtung und die Schrägstrecke erfasst,
- ein *Barometer* zur Messung von Höheninformationen basierend auf Druckvariationen.

Zusätzlich werden folgende Informationen und Modelle genutzt:

- *Hydrodynamisches Modell für die Wasserspiegellage* des zu befahrenden Gewässers,
- ein *Squatmodell* für das genutzte Schiff,
- *Bestandsdaten* der Gewässervermessung in Form von Null- und Gegenpunkten sowie die dazugehörige Kilometrierung des zu befahrenden Gewässers,
- *Geoidmodell*,
- Koordinateninformationen über *Abschattungsbereiche*.

Abb. 1 zeigt den Datenfluss zwischen den eingesetzten Sensoren sowie die genutzten Modelle und Informationen.



**Abb. 1:** Sensorintegration und Datenfluss innerhalb des Multi-Sensor-Systems HydrOs (nach Breitenfeld et al. 2014)

**Literatur**

BfG (2015): HydrOs – Entwicklung eines integrierten hydrographischen Ortungssystems; BfG-Bericht 1856, Koblenz

BfG (Hrsg.) (2013): FLYS goes WEB: Eröffnung eines neuen hydrologischen Fachdienstes in der BfG; Kolloquium am 15./16. Mai 2013 in Koblenz

Breitenfeld, Marc; Harry Wirth; Annette Scheider; Volker Schwieger (2014): Development of a Multi-Sensor System to optimize the Positioning of Hydrographic Surveying Vessels; Proceedings on 4th International Conference on Machine Control & Guidance, 19.–20. März 2014 in Braunschweig

Briggs, Michael J. (2009): Ankudinov Ship Squat Predictions – Part I: Theory, Parameters, and FORTRAN Programs; US Army Corps of Engineers, 2009

Briggs, Michael J. (2006): Ship Squat Predictions for Ship/Tow Simulator; US Army Corps of Engineers, 2006

Caspary, Wilhelm; Jian-Guo Wang (1998). Redundanzanteile und Varianzkomponenten im Kalman Filter; Zeitschrift für Vermessungswesen, Vol. 123, Nr. 4, 1998, S. 121–128

Gelb, Arthur (Hrsg.) (1974): Applied Optimal Estimation; The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts

Hentschinski, Monika; Harry Wirth (2012): Untersuchung integrierter GNSS-INS-Navigationssysteme; BfG-Bericht 1743, Koblenz

Heunecke, Otto; Heiner Kuhlmann; Walter Welsch; Andreas Eichhorn; Hans Neuner (2013): Handbuch Ingenieurgeodäsie – Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen; Wichmann, Berlin ...

In der Software HydrOs werden die Informationen von allen Sensoren für die Positionierung gemeinsam betrachtet. HydrOs erfasst, speichert und prozessiert alle Daten mit einer wählbaren Prozessierungsrate (hier 10 Hz), berechnet Qualitätsparameter (siehe Tabelle 1) und stellt die Ergebnisse anschaulich dar.

Um die Position und die räumliche Orientierung des Schiffs zu optimieren, wird ein Erweitertes Kalman-Filter (EKF) verwendet. Das EKF stellt eine Erweiterung des von Rudolf Kálmán vorgestellten Filters dar (Kalman 1960), sodass dieses auch für nichtlineare Zusammenhänge eingesetzt werden kann, wie beispielsweise im Buch von Arthur Gelb beschrieben (Gelb 1974).

Zunächst wird im Prädiktionsschritt das Bewegungsverhalten des Schiffes durch Systemgleichungen modelliert (1). Im zweiten Schritt werden die Beobachtungen mit Hilfe von (nichtlinearen) Beobachtungsgleichungen integriert (2). Als Beobachtungen gelten hier die Messdaten sowie Wasserspiegellagen des flusshydrologischen Webdienstes FLYS (BfG 2013).

Prinzipiell setzt sich das EKF aus dem Systemmodell (1) und den Messgleichungen (2) zusammen:

$$x_{k+1} = T_{k+1,k} \cdot x_k + B_{k+1,k} \cdot u_k + C_{k+1,k} \cdot w_k \quad (1)$$

$$l_{k+1} = A_{k+1} \cdot x_{k+1} + \epsilon_{k+1} \quad (2)$$

Mit Zustandsvektor  $x_{k+1}$  der Epoche  $k+1$ , der Transitionsmatrix  $T$ , der Stellgrößenmatrix  $B$ , dem Stellgrößenvektor  $u_k$ , der Störgrößenmatrix  $C$ , den Störgrößen  $w_k$ , dem Beobachtungsvektor  $l_{k+1}$ , der Messmatrix  $A_{k+1}$  und dem Vektor der Messabweichungen  $\epsilon_{k+1}$

Wie in der Gleichung des EKF ersichtlich, ist die Bewegung auf bestimmte Ursachen bzw. Stellgrößen – wie die Motorkraft und aus der Schubrichtung resultierende Drehmomente – zurückzuführen.

Werden hingegen die Stellgrößen  $u_k$  in der Modellierung vernachlässigt, so bildet die Systemgleichung ein kinematisches Modell. In HydrOs wurden mehrere Prädiktionsansätze entwickelt und realisiert, die im BfG-Bericht 1856 beschrieben sind (BfG 2015). Im Weiteren werden die Berechnungen exemplarisch mit dem dort aufgeführten gleichförmig beschleunigten Geradenmodell ausgeführt.

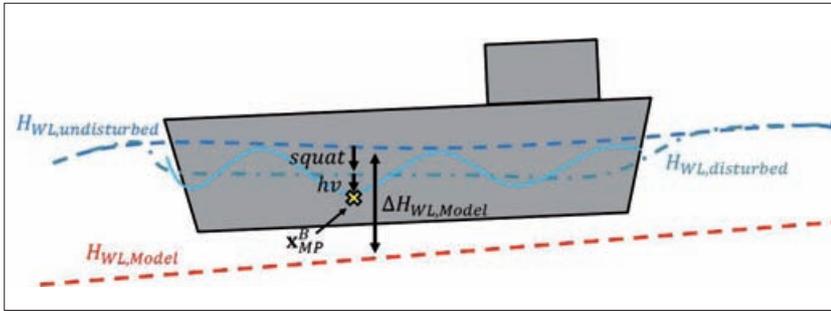
Die zeitabhängigen Matrizen  $T_{k+1,k}$ ,  $B_{k+1,k}$ ,  $C_{k+1,k}$  und  $A_{k+1,k}$  werden dabei aus den linearisierten System- und Messgleichungen bestimmt.

**2.1 Qualitätssicherungskonzept**

Um den Anwender über den Status der eingehenden Messdaten und der prädierten Zustandsgrößen zu informieren, müssen diese kontinuierlich überwacht werden. Dazu wurde ein Qualitätssicherungskonzept aufgestellt. In Anlehnung an Thomas Wiltshko (2004) wurden verschiedene Qualitätsmerkmale definiert, sodass die Qualität der Daten anhand der zugehörigen Qualitätsparameter quantitativ bewertet werden kann.

Merkmal	Parameter
Verfügbarkeit	Verfügbarkeitsrate: Vorhandensein der Messdaten an der Schnittstelle
Konsistenz	Richtigkeitsmaß: Liegen die Messgrößen im definierten Wertebereich?
Vollständigkeit	Vollständigkeitsrate: Sind die eingehenden Informationen vollständig?
Korrektheit	Anteil der Ausreißer an der gesamten Datenreihe: Stimmen die Daten mit der Realität überein oder handelt es sich um Ausreißer?
Geometrische Genauigkeit	Varianzen, Innovationen
Zeitliche Genauigkeit	Genauigkeit der Rechneruhr bezogen auf UTC

**Tabelle 1:** Qualitätsmerkmale und die zugehörigen Qualitätsparameter



**Abb. 2:** Zusammenhang zwischen gestörtem Wasserspiegel und Wasserspiegelhöhenmodell bei dynamischer Fahrt des Schiffes

Wird erkannt, dass die Qualität einzelner Daten nicht den Spezifikationen entspricht, so werden geeignete Gegenmaßnahmen ergriffen: Die jeweiligen Messdaten werden verworfen bzw. die detektierten Zustands- und Stellgrößen werden mit einer größeren A-priori-Varianz versehen.

## 2.2 Integration von hydrologischen Parametern und schiffsdynamischen Größen

Im Bereich der Hydrologie werden hydrodynamische Modelle entwickelt, mit denen im Binnenbereich für vorgegebene Abflussmengen entsprechende Wasserspiegellagen sowie mittlere Strömungsgeschwindigkeiten der Querschnitte berechnet werden können. Eine Wasserspiegellage beschreibt den Wasserstand längs eines Flussabschnittes bei stationärem Abfluss durch eine stationsabhängige Folge von Wasserspiegelhöhen. Diese hydrologischen Parameter sind bisher

in keinem den Autoren bekannten integrierten Ortungssystem verwendet worden. Das hydrodynamische Modell ist eine gute Approximation an den aktuellen tatsächlichen ungestörten Wasserspiegel und bietet einen absoluten Höhenbezug auch bei Längsgefälle. Das Modell kann in das Multi-Sensor-System integriert werden, wenn die dynamischen Einflussgrößen wie Squat, Sunk und Schwall messtechnisch erfasst und im Auswertemodell berücksichtigt werden (Abb. 2).

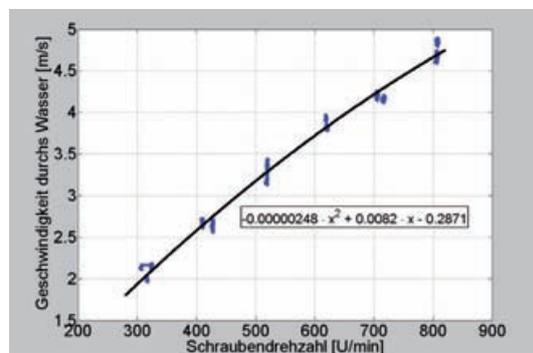
Die aktuelle durch die Schiffsdynamik verursachte Tiefgangsänderung wird im Hubsensor gemessen. Da die in der Literatur (Briggs 2006, Briggs 2009) erwähnten Algorithmen zur Squatbestimmung oft zu pessimistische Werte angeben und auch für andere Schiffsbautypen ausgelegt sind, wurde hier eine Squatformel empirisch bestimmt, mit der für einen Referenzpunkt auf dem Peilschiff (PS) »Mercator« das mittlere dynamische Einsinken berechnet wird (siehe BfG 2015). Als Referenzpunkt für das Kennfeld des Squat (engl.: »niederhocken«, Absink gegenüber Ruhelage) wird der Monitoring Point  $x_{MP}^B$  gewählt.

Der Zusammenhang zwischen der Messgröße Hub und den Zustandsgrößen ergibt sich wie folgt:

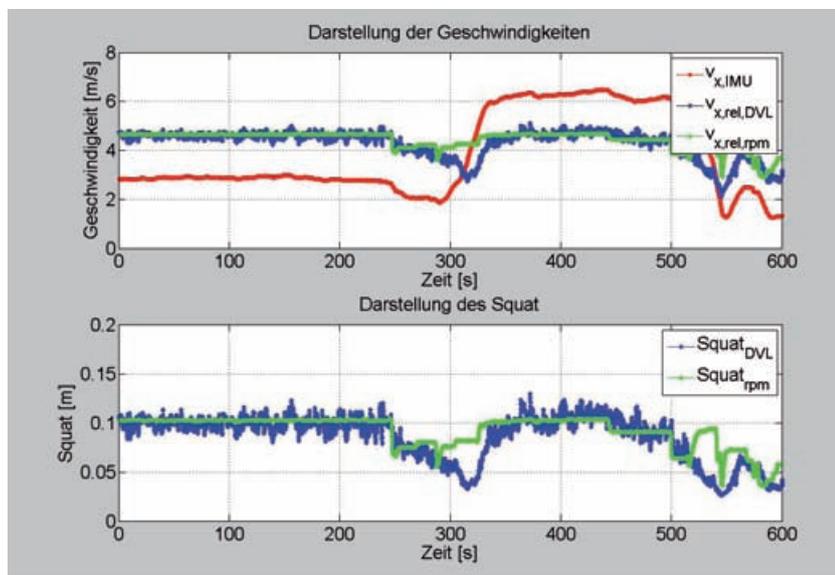
$$h_{v_{k+1}} = H_{WL,Model,k+1} + \Delta H_{WL,Model,k+1} + Load - Squat_{k+1} - H_{MP,k+1} \quad (3)$$

Mit der Höhe des Wasserspiegelmodells  $H_{WL,Model,k+1}$ , dem Fehler des Modells  $\Delta H_{WL,Model,k+1}$ , der Tiefgangsänderung aufgrund Umballastierung Load, der NHN-Höhe am Monitoring Point  $H_{MP,k+1}$

**Abb. 3:** Funktionaler Zusammenhang zwischen Schraubendrehzahl und Geschwindigkeit durchs Wasser



**Abb. 4:** Squat in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit relativ zum fließenden Gewässer



Der für PS »Mercator« bestimmte Squat variiert je nach Fahrtgeschwindigkeit durch das Wasser und verbleibender Unterkieffreiheit zwischen 0 cm und ca. 15 cm, bei einer Standardabweichung von ca. 1 cm. Das vollständige Squatmodell wurde im BfG-Bericht 1856 (2015) und von Scheider et al. (2014) beschrieben.

Um die Geschwindigkeit durch das Wasser zu ermitteln, wurde ein Doppler Velocity Log (DVL) zur direkten Messung eingesetzt. Alternativ kann die Geschwindigkeit durch das Wasser bei bekanntem funktionalen Zusammenhang aus der anliegenden Schraubendrehzahl berechnet werden. Für die Unterkieffreiheit wird dabei ein konstanter mittlerer Wert verwendet.

Das Ergebnis einer Polynomapproximation nach der Methode der kleinsten Quadrate (Abb. 3) zeigt, dass der Zusammenhang zwischen Schraubendrehzahl und Fahrtgeschwindigkeit durch ein quadratisches Polynom mit einer Standardabweichung von 8 cm/s beschrieben werden kann.

Es stellt sich die Frage, ob beide Verfahren zur Geschwindigkeitsbestimmung gleichwertig sind bzw. ausreichende Genauigkeiten liefern. Dazu wird im Folgenden eine zusammenhängende Berg- und Talfahrt einschließlich Wende betrachtet (Abb. 4). Die Bergfahrt erfolgte mit

einer Geschwindigkeit von ca. 3 m/s und die Talfahrt mit einer Geschwindigkeit von ca. 6 m/s (rote Kurve).

Bei geringen Steuermanövern stimmt die über die Schraubendrehzahl berechnete relative Geschwindigkeit (grüne Linie) mit der vom DVL gemessenen relativen Geschwindigkeit (blaue Linie) gut überein. Größere Abweichungen entstehen beim Wenden des Schiffes oder bei Beschleunigungsphasen.

Die Differenzen zwischen der Zeitreihe des Squat mit DVL-Geschwindigkeiten (blaue Linie im unteren Teil von Abb. 4) und der Zeitreihe des Squat mit Geschwindigkeiten aus der Schraubendrehzahl (grüne Linie) sind bei Standardbedingungen, das heißt keine Fahrmanöver und nahezu konstante Unterkieflfreiheit, kleiner als 2,5 cm. Daher kann zwischen zwei Varianten zur Berechnung des Squat gewählt werden.

### 2.3 Integration eines Tachymeters

Üblicherweise wird ein motorisiertes Tachymeter stabil über einem Punkt an Land aufgebaut und auf dem bewegten Ziel ein Reflektorkranz angebracht. Diese Messanordnung hat den Nachteil, dass weiterhin ein Landmesstrupp eingesetzt werden muss und der Arbeitsbereich des Messschiffes auf die Reichweite des Tachymeters (500 m bis 700 m) eingeschränkt ist. In HydrOs wurde daher versucht, das Messprinzip umzukehren: Das Tachymeter wird an Bord angebracht (Abb. 5) und bei Bedarf werden in bekannten GNSS-Abschattungsbereichen ein oder mehrere Reflektoren fest installiert (inverses Prinzip).

Um ein Tachymeter integrieren zu können, muss zunächst die Position und Orientierung des Instruments im Schiffskordinatensystem bestimmt werden. Dies geschieht mittels einer freien Stationierung im Rahmen des Schiffskordinatensystems, welches durch auf dem Schiffskörper angebrachte Festpunkte und deren Koordinaten realisiert ist.

Die Untersuchung zeigte, dass diese Messungen problematisch sind: Die Sichtverbindung zwischen Tachymeter und Reflektor wird immer wieder durch Hindernisse (vorbeifahrende Schiffe, stationäre Hindernisse etc.) unterbrochen, wodurch eine erneute manuelle Anzielung des Reflektors notwendig wurde. Außerdem stoßen die im Tachymeter implementierten Algorithmen zur Zielverfolgung bei einer ständigen unregelmäßigen Orientierungsänderung des Schiffes teilweise an ihre Grenzen.

Die erzielbare Genauigkeit ist ausreichend, sodass versucht wird, die Hersteller zu bewegen, zukünftig die Zielverfolgung durch Adaption des Prädiktionsalgorithmus zu verbessern.

## 3 Untersuchungsergebnisse

Um eine Evaluierung des entwickelten Systems vornehmen zu können, wurden mehrere Messfahrten durchgeführt.



Abb. 5: Tachymeter an Bord von PS »Visurgis«

### 3.1 Messprogramm

Das Messgebiet liegt im Stadtbereich Duisburg zwischen den Stadtteilen Homburg und Ruhrort (Abb. 6). Es wurden folgende Messfahrten durchgeführt:

- Flächenpeilung über die gesamte Fahrwasserbreite ohne Abschattungsbereiche (rote Trajektorie),
- Flächenpeilung über die gesamte Fahrwasserbreite mit einer Brücke (gelbe Trajektorie),
- Messfahrt mit sehr wenig Dynamik auf dem Hafenkanal (grüne Trajektorie),
- Messfahrt mit sehr hoher Dynamik auf dem Rhein im Bereich der roten Trajektorie,
- Messfahrt mit einseitigen GNSS-Abschattungen im Bereich der Brücke auf dem Rhein.

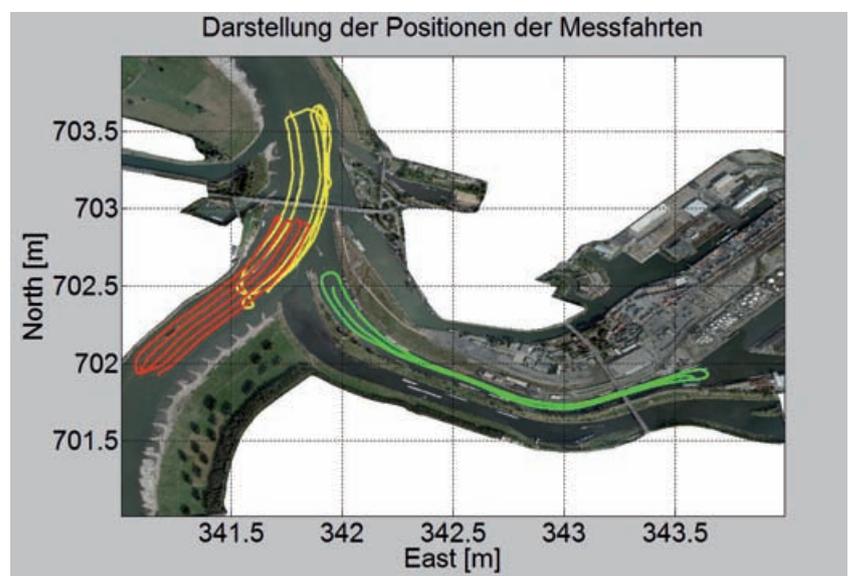
### 3.2 Untersuchung der Genauigkeit und Verfügbarkeit

#### Verfügbarkeit

Das HydrOs-System besteht in der Minimalkonfiguration ähnlich wie marktgängige Systeme aus einem GNSS-Empfänger mit RTK-Option, einer IMU und einem GNSS-Kompass.

- ...  
Kalman, Rudolf E. (1960): A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems; Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, Vol. 82, Series D, S. 35–45  
Rauch, H.E.; F. Tung; C.T. Striebel (1965): Maximum Likelihood Estimates of Linear Dynamic Systems; AIAA Journal, Vol. 3, No. 8, S. 1445–1450  
Scheider, Annette; Harry Wirth; Marc Breitenfeld; Volker Schwieger (2014): HydrOs – An Integrated Hydrographic Positioning System for Surveying Vessels; FIG Congress 2014, 16.–21. Juni 2014, Kuala Lumpur  
Wiltshcko, Thomas (2004): Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten; VDI Verlag, Düsseldorf  
Wang, Jian-Guo (2009). Reliability Analysis in Kalman Filtering; Journal of Global Positioning Systems, Vol. 8, No. 1

Abb. 6: Übersicht über das Messgebiet sowie beispielhafte Messfahrten



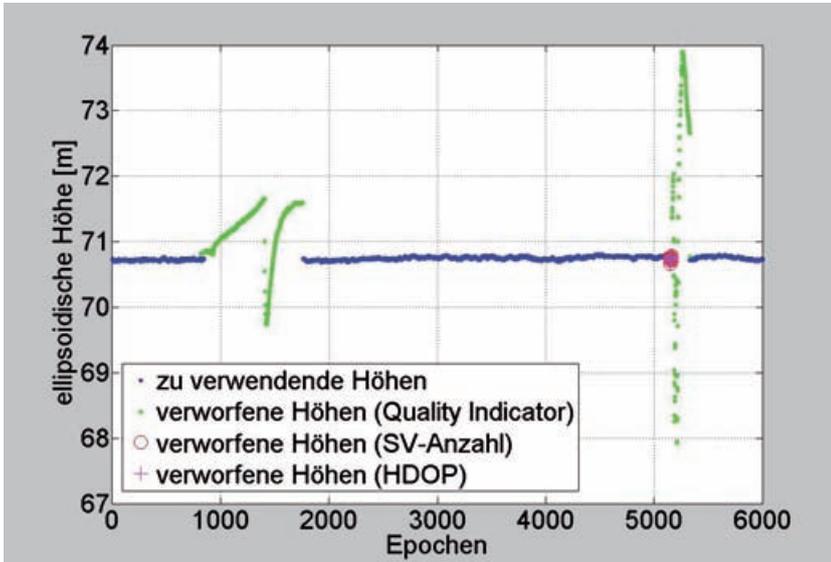


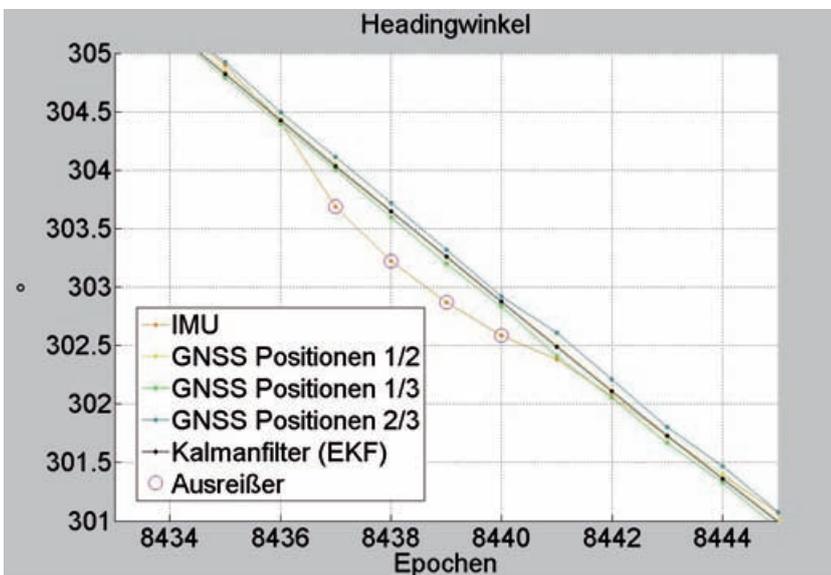
Abb. 7: Detektion der Problembereiche anhand von Qualitätsmerkmalen

Fällt der GNSS-Korrekturdienst aus (vgl. Abb. 7, Problembereich bei Epoche 1000) oder ergeben sich aufgrund ungünstiger Satellitenkonstellation bzw. Abschattungen (vgl. Abb. 7, Problembereich bei Epoche 5200) geringe Genauigkeiten, so führt dies zu größeren Abweichungen in den Beobachtungen des GNSS-Empfängers. Würden diese Daten im EKF verwendet werden, würde dies zu einem ebenfalls ungenauen Filterergebnis führen.

Das EKF liefert immer Daten, auch wenn Messlücken auftreten, insofern ist das EKF immer verfügbar, auch wenn die GNSS-Qualitätskriterien nicht erfüllt sind. Mit Verfügbarkeit wird im Folgenden daher die nach Prüfung aller Qualitätskriterien verbleibende Menge an Eingangsdaten bezeichnet.

In HydrOs wird deshalb, entsprechend dem Qualitätssicherungskonzept, vor Übernahme in das EKF geprüft, ob die zulässigen Wertebereiche der von den GNSS gelieferten Kennzahlen (wie den DOP-Werten, siehe Abb. 7) eingehalten werden, sodass die meisten fehlerhaften Positionsbeobachtungen (grüne Signatur) automatisch detektiert und eliminiert werden können. Eine weitere Möglichkeit zur

Abb. 8: Verifizierung der Ausreißerdetektion in der Beobachtung Heading (IMU)



Eliminierung von unplausiblen GNSS-Positionen besteht darin, ein Umringspolygon für Bereiche zu definieren, in denen erfahrungsgemäß mit (Teil-) Abschattungen zu rechnen ist. Dieses Polygon kann z. B. über die vier Eckpunktkoordinaten einer Brücke realisiert werden.

Die statistische Auswertung der Verfügbarkeit der Messdaten zeigt eindeutig, dass in der Praxis auch außerhalb von abgeschatteten Bereichen GNSS-Ausfälle oder GNSS-Daten mit unzureichender Qualität weit häufiger vorkommen, als dies bisher bekannt war. Die Qualitätskriterien wurden außerhalb der Abschattungsbereiche im Durchschnitt von 5 % bis 8 % der GNSS-Daten nicht eingehalten. Im Extremfall traten in einer Messfahrt von ca. 2 h Länge bis zu 19 Lücken auf, wovon vier größer als 1 Minute waren. Unter der Voraussetzung, dass die Dauer einer Lücke von 60 Sekunden nicht überschritten wird, beträgt die Verfügbarkeit der Ortung in *allen* Bereichen mit HydrOs 100 %.

### Steigerung der inneren Zuverlässigkeit durch Filterabstimmung und Ausreißertests

Innerhalb des Algorithmus des EKF muss die Systemstochastik  $\Sigma_{ww}$ , die Messstochastik  $\Sigma_{ll}$  sowie die Stochastik der Stellgrößen  $\Sigma_{uu}$  vorgegeben werden, um eine optimale Schätzung zu erreichen. Mit HydrOs können im Postprozessingmodus Varianzkomponenten für jede dieser Größen berechnet werden (Heunecke et al. 2013, Wang 2009). Diese werden für weitere Auswertungen auf den entsprechenden Diagonalelementen der Kovarianzmatrizen eingesetzt. Bei einer automatischen Abstimmung der Stochastik mit geschätzten Varianzfaktoren nähert sich die globale Varianz der Gewichtseinheit nach einer gewissen Einschwingzeit (wiederholtes Einsetzen der Ergebnisse) dem Wert 1 an.

Des Weiteren liegen die nach Caspary und Wang (1998) berechneten Redundanzanteile aller Beobachtungen bei einer optimalen Abstimmung zwischen 0,5 und 0,8, das heißt, sie sind ausbalanciert und kontrolliert.

Diese gleichmäßige Verteilung der Redundanzanteile ist Voraussetzung für eine vergleichbare hohe innere Zuverlässigkeit bzw. die Fähigkeit, auch kleinere Ausreißer sicher zu detektieren. Das Störuschen  $\Sigma_{ww}$  beschreibt die Abweichung der in den Systemgleichungen modellierten Bewegung von der realen Bewegung. Die Filterabstimmung mit festem, für einen Filterlauf global gültigem Störuschen birgt die Gefahr, dass z. B. bei Kurvenfahrten oder ungleichförmigen Beschleunigungen starke Abweichungen vom Bewegungsmodell nicht erfasst werden. Dies kann ein Überschwingen des Filters bewirken und im Extremfall zur Filterdivergenz führen.

Dem wird in HydrOs erfolgreich durch eine adaptive Anpassung des Störuschens (BfG 2015) vorgebeugt. In jeder Epoche werden die Störbeschleunigungen mitgeschätzt. Überschreiten die geschätzten Werte vorgegebene Schwellenwer-

te, so werden in der Störtauschmatrix anstelle der festen A-priori-Werte die Schätzwerte der Störbeschleunigungen verwendet. Das Filter folgt dann mehr den Messwerten als dem prädierten Systemzustand. Insbesondere bei den dynamischen Messfahrten wurde durch die adaptive Filterung in allen Kurven eine Verbesserung erreicht.

Um eine unverzerrte Schätzung des Systemzustands zu gewährleisten, können mit HydrOs Ausreißertests für die Messungen, den Zustandsvektor und auch die Störgrößen durchgeführt werden. Beispielhaft sei hier gezeigt, wie das System im Headingwinkel Ausreißer aufdeckt (Abb. 8).

Die detektierten Ausreißer weichen um ca.  $0,3^\circ$  von der berechneten EKF-Lösung und den zum Vergleich mit dargestellten, aus den ungefilterten Positionen der drei GNSS-RTK-Empfänger berechneten Headingwinkeln ab. Da die Ausreißer eliminiert wurden, wird das Filterergebnis (schwarze Kurve) nicht negativ beeinflusst. Fehlerhafte Headingwinkel traten in allen Bereichen mit hoher Drehrate gehäuft auf.

## Genauigkeit

Zunächst wurde untersucht, wie gut mit der Minimalconfiguration eine Lücke von mindestens 60 Sekunden überbrückt werden kann. In den Daten der Messfahrt (c) wurden durch zwei Umringspoligone Lücken verschiedener Länge generiert.

Da die Beobachtungen einer IMU nicht durch Abschattungsbereiche gestört werden und nahezu ohne Lücken vorliegen, wird die Verfügbarkeit durch die Integration einer IMU grundsätzlich deutlich gesteigert (Abb. 9, schwarze Kurve).

Um einen Eindruck über die mit der Minimalconfiguration im EKF erreichbare Genauigkeit zu erhalten, wurde ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt. Dabei werden die geschätzten gefilterten Koordinaten des EKF mit lückenlos zur Verfügung stehenden GNSS-Positionen als Soll-Trajektorie verwendet. Am Ende der ersten Lücke von ca. 62 Sekunden Dauer (zwischen Epoche 1019 und 1638) beträgt die Lageabweichung 0,512 m und die maximale Höhenabweichung 0,159 m. Am Ende der zweiten zeitlich größeren Lücke (99,8 Sekunden) erhöhen sich die Abweichungen in der Lage auf 0,743 m und in der Vertikalen auf 0,319 m. Dieses zeitabhängige Driftverhalten ist auf die numerische Integration der Beschleunigungen und Drehraten innerhalb der IMU zurückzuführen. Die Genauigkeitsanforderungen bzw. die gesteckten Ziele sind daher im EKF mit der Minimalconfiguration nur in Lücken bis ca. 40 Sekunden Länge erreichbar.

Eine Verbesserung wird im Postprozessing mit Hilfe der Rückwärtsrechnung nach dem Rauch-Tung-Striebel-Algorithmus (RTS-Algorithmus) erreicht (Rauch et al. 1965). In Abb. 10 ist das Ergebnis der Auswertung mit RTS-Algorithmus dargestellt (braune Kurve), die gesteckten Anforderungen werden in diesem Beispiel mit der Lageabweichung von 0,018 m und der Höhenabweichung

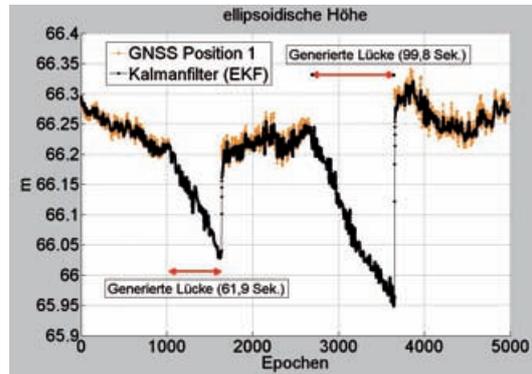


Abb. 9: Auswertung im EKF mit Hilfe der Minimalconfiguration

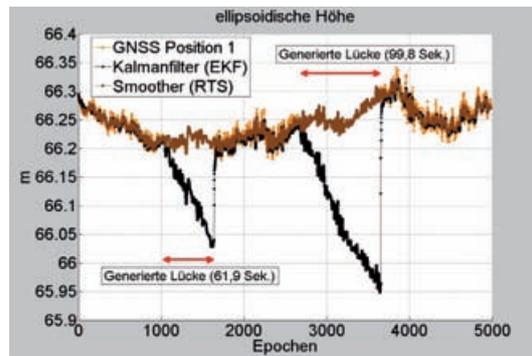


Abb. 10: Auswertung mit dem RTS-Algorithmus mit Hilfe der Minimalconfiguration

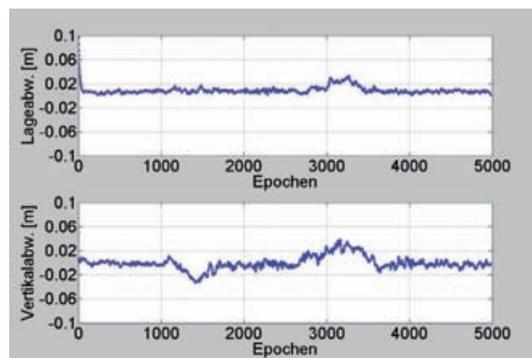


Abb. 11: Abweichungen der Ergebnisse des RTS-Algorithmus zur Soll-Trajektorie

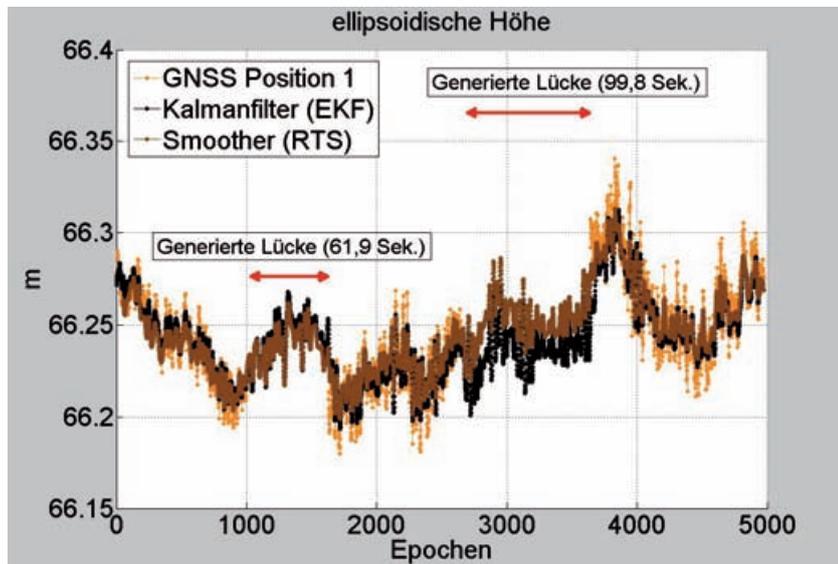
von 0,033 m erfüllt (Abb. 11). Nicht alle Lücken konnten mit der oben genannten Qualität allein durch den RTS-Algorithmus geschlossen werden. Es müssen weitere absolut messende Sensoren integriert werden. Außerdem steht diese Option für eine Auswertung im Echtzeitmodus nicht zur Verfügung.

Im Vergleich zur Minimalconfiguration wird durch die Integration des Wasserspiegellagenmodells das Driftverhalten in der Höhenganglinie schon im EKF eliminiert, sodass die geforderte Genauigkeit in der Höhe in beiden Lücken erreicht wird (maximale vertikale Abweichung 0,054 m, siehe Abb. 12).

Für eine ausreichend genaue Berechnung der Lagekomponente werden jedoch noch weitere, absolut messende Sensoren benötigt.

Die Verwendung von mehreren GNSS-Empfängern verbessert nicht nur die innere Zuverlässigkeit, sondern bei entsprechender Gewichtung auch die Genauigkeit.

Zunächst fällt in Abb. 13 auf, dass die Höhenkurve des dritten GNSS-Empfängers (gelbe Kurve) teilweise bis zu zehn Zentimeter von den anderen Kurven abweicht. Die Abweichungen sind zu klein,



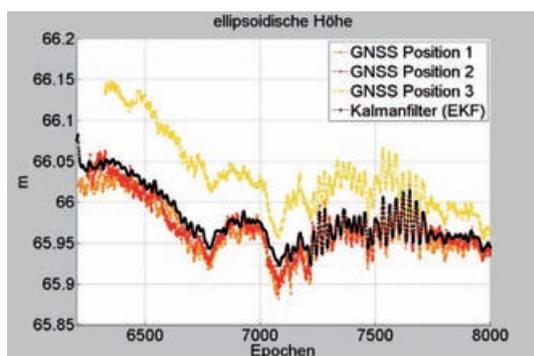
**Abb. 12:** Auswertung mit EKF und RTS-Algorithmus mit Hilfe der Minimalkonfiguration mit Hub und Wasserspiegellagenmodell

um sicher von Ausreißertests aufgedeckt zu werden, sodass dieses Problem auf andere Weise gelöst werden muss. Aufgrund der Redundanz kann hier mit Hilfe der Varianzkomponentenschätzung nachgewiesen werden, dass die Genauigkeit des dritten Empfängers im Vergleich zu den anderen beiden Empfängern deutlich geringer ist. Durch die realistischere Gewichtung des dritten GNSS-Empfängers liegt das Ergebnis des EKF näher an der realen Höhe. Außerdem verringert sich die geschätzte Standardabweichung des Zustandsvektors, die innere Zuverlässigkeit wird gesteigert, wodurch Ausreißer im Filterprozess besser erkannt werden. Durch die Verwendung von drei GNSS-Empfängern wird auch die Schätzung der Orientierungswinkel verbessert.

Die Beispiele wurden im kinematischen Systemmodell berechnet. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich mit aufwendigeren dynamischen Modellen unter Standardbedingungen (keine Manöver und nahezu konstante Unterkielfreiheit) eine nahezu identische Genauigkeit ergibt. Bei extremen Beschleunigungsmanövern ist zu erwarten, dass die Genauigkeit der dynamischen Modelle jedoch tendenziell besser wird; dies muss noch untersucht werden.

Durch Vergleich der mit HydrOs gemessenen Wasserspiegelhöhe mit Pegelangaben konnte bei GNSS-RTK-Empfang eine absolute Höhenmessunsicherheit von 1 cm bis 2 cm mit einem Grad des Vertrauens von 95 % nachgewiesen werden.

**Abb. 13:** Höhenganglinien mit drei GNSS-Empfängern ungleicher Gewichtung



Das eingesetzte DVL zeigt in der Praxis eine deutlich schlechtere Genauigkeit der gemessenen Geschwindigkeit über Grund als die IMU. Das DVL ist also nicht direkt als unabhängige Kontrolle geeignet, vielmehr trägt es durch die Redundanz dazu bei, dass die Kontrolliertheit der IMU verbessert wird. Das DVL oder die Drehzahl der Motoren werden jedoch für die Berechnung der Geschwindigkeit durch das Wasser benötigt.

Das Barometer wurde ebenfalls integriert. Um Staueffekte durch den Fahrtwind zu vermeiden, wurde eine Piezo-Sonde konstruiert und eingesetzt. Trotzdem sind die aus den Druckdifferenzen berechneten Höhendifferenzen zu ungenau, so dass das Filterergebnis nicht verbessert wird.

Das Tachymeter ist ein absolut messender Sensor, der prinzipiell die in größeren Lücken in Echtzeit zu geringe Genauigkeit der Lagekomponente ausgleichen könnte. Wie die Untersuchungen gezeigt haben, ist das Messverfahren grundsätzlich geeignet, obwohl die Messgenauigkeit schlechter ist als bei Messungen von einem festen Standpunkt. Wegen der häufigen Signalverluste ist das Verfahren gegenwärtig nicht praxisreif einsetzbar.

#### 4 Fazit

Die im Zuge des Projekts entstandene Software HydrOs ist ein funktionsfähiger Prototyp, mit dem deutlich bessere Ortungsergebnisse erzielt werden können als mit der bisher eingesetzten Technik (Hentschinski u. Wirth 2012).

Die Positionsschätzung gelingt mit Hilfe eines Erweiterten Kalman-Filters, der unterschiedliche situationsangepasste 3D-Prädiktionsmodelle für die Bewegung des Vermessungsschiffes umfasst. Die wechselnde Dynamik der Schiffsfahrt kann durch adaptive Anpassung des Störrauschens berücksichtigt werden. Weiterhin wurde eine empirische Squat-Funktion ermittelt und die Nutzung von Wasserspiegellagenmodellen integriert. Die anspruchsvollste Anforderung des Projekts, bei vollständigem Ausfall von GNSS mit 95 % Sicherheitswahrscheinlichkeit über einen Zeitraum von bis zu 60 Sekunden die Lage-Ortungsunsicherheit von maximal 30 cm in beiden Koordinatenkomponenten und die Höhenmessunsicherheit von maximal 10 cm einzuhalten, konnte generell im Postprocessing erfüllt werden.

Die neue Methode, GNSS-Höhenmessungen mit Hubsensor und Wasserspiegellagenmodellen zu verknüpfen, steigert die Höhenmessgenauigkeit in Lücken deutlich gegenüber der Genauigkeit, die mit marktüblichen Systemen erreicht wird (z. B. 0,8 m Abweichung nach einer Minute ohne Unterstützung, PHINS 6000 von iXBlue).

In einem Ergänzungsvorhaben soll erforscht werden, inwieweit durch verbesserte Schätzmethoden und die Integration weiterer absolut messender Sensoren – wie photogrammetrische Systeme – in Lücken eine bessere Lagegenauigkeit erreicht werden kann. [↕](#)