

# Lückenlose Positionsbestimmung zur Georeferenzierung von hydrographischen Messdaten

## Seamless Positioning to Georeference Hydrographic Measurement Data

Annette Scheider, Aiham Hassan, Thomas Brüggemann, Volker Schwieger

Um genaue Informationen über die Form eines Gewässeruntergrunds bereitstellen zu können, muss dieser regelmäßig mit hydrographischen Methoden erfasst werden. Hierzu kommen im Allgemeinen Peilschiffe zu Einsatz. Die mittels Echolot erfassten bathymetrischen Daten müssen dabei georeferenziert werden. Heutzutage sind auf Peilschiffen zu diesem Zweck GNSS-Empfänger bzw. gekoppelte GNSS/inertial messende Systeme installiert, die auf Bundeswasserstraßen kinematisch die Positionskoordinaten bereitstellen (RTK-Lösung). Diese Systeme eignen sich jedoch nur begrenzt für Gewässerabschnitte, in denen es aufgrund von Hindernissen am Ufer (Bauwerke, Vegetation etc.) oder Brücken zu einer (Teil-) Abschattung von GNSS-Signalen kommt. Auch in Mobilfunklöchern können die Koordinaten nicht mit ausreichender Genauigkeit zur Verfügung gestellt werden. Aus diesem Grund wird ein integriertes hydrographisches Ortungssystem (HydOs) als Positionierungs-Multi-Sensor-System durch verschiedene Instrumente und Sensoren erweitert, sodass auch in Bereichen ohne vorhandene RTK-Positionslösung eine Georeferenzierung der bathymetrischen Daten möglich ist. Dazu werden verschiedene Auswertungsansätze innerhalb eines Kalman-Filter-basierten Auswertungsalgorithmus getestet. In diesem Beitrag wird exemplarisch die Integration von zusätzlichen Informationen vorgestellt. Dabei handelt es sich zum einen um zusätzliche Beobachtungsgrößen (Parameter der äußeren Orientierung aus Bilddaten), um Stellgrößen (Größen des Schiffsantriebs und Strömungsinformationen) sowie um die modellierte Wasserspiegellage aus einem flusshydrologischen Modell als Pseudo-Beobachtung. Insbesondere die Integration Letzterer führt im Postprocessing auch bei Lücken im GNSS-Empfang von bis zu 60 s zu einer Höhenabweichung von unter 1 dm.

**Schlüsselwörter:** Multi-Sensor-System, Positionsbestimmung, erweitertes Kalman-Filter, Hydrographie

*In order to provide accurate information on the shape of a river bed, it has to be regularly surveyed using hydrographic methods. In general, survey vessels are used for this purpose. Bathymetric data acquired by echosounders has to be georeferenced. Nowadays, GNSS receivers or coupled GNSS/inertial measuring systems are installed on survey vessels to provide the position coordinates kinematically (RTK solution). However, these systems are only suitable to a limited extent for sections of inland waterways where (partial) shading of GNSS signals occurs due to obstacles on the river bank (buildings, vegetation, etc.) or bridges. Also in dead spots of the cellular network, the coordinates cannot be provided with sufficient accuracy. For this reason, the positioning multi-sensor system is extended by different instruments and sensors to an integrated hydrographic positioning system (HydOs project). So, bathymetric data can be georeferenced even in areas without a valid RTK positioning solution. For this purpose, different evaluation approaches within a Kalman filter-based processing algorithm are tested. In this article the integration of*

*additional information is presented as an example. These are additional observation variables (parameters of external orientation from image data), control variables (variables of the ship propulsion and flow velocity) and the modelled water level from a river hydrological model as pseudo-observation. Especially the integration of the latter leads to a height deviation of less than 1 dm in post-processing even with gaps in GNSS reception of up to 60 s.*

**Keywords:** Multi-sensor system, positioning, Extended Kalman Filter, hydrography

## 1 EINLEITUNG

Im Jahr 2019 wurden ca. 205 Mt an Gütern auf deutschen Bundeswasserstraßen befördert, was einem Anteil von 7,3 % am gesamten Güterverkehr in Deutschland entspricht /Statista 2020/. Seit 2013 ist dieser Anteil um 2 % zurückgegangen, was unter anderem auf die niedrigen Wasserstände auf den Bundeswasserstraßen zurückzuführen ist /Statista 2020/. Schiffsführer müssen die Lademenge reduzieren, um bei niedrigen Pegelständen die Gefahr einer Havarie, z.B. durch Grundberührungen oder sogar durch Festfahren auf einer Sandbank, zu vermeiden. Um die Lademenge für den jeweiligen Wasserstand zu optimieren, werden aktuelle und geometrisch genaue bathymetrische Tiefeninformationen benötigt. Um solche Tiefeninformationen bereitzustellen, muss der Gewässergrund aller Bundeswasserstraßen regelmäßig vermessungstechnisch erfasst werden. Gleichzeitig kann durch die regelmäßige Erfassung des Zustands des Gewässergrunds überwacht werden, ob Baumaßnahmen, wie etwa das Ausbaggern der Fahrrinne oder eines Hafenbeckens, erforderlich sind.

Die Topographie des Gewässergrunds wird im Allgemeinen durch hydroakustische Methoden erfasst. Dazu sind Vermessungsschiffe mit Echoloten ausgerüstet, die ein nach unten gerichtetes Schallsignal aussenden und dessen Rückstreuung wieder empfangen. Anhand der Laufzeit der zurückgestreuten Schallsignale können die aktuellen Wassertiefen gemessen werden. Hierzu muss zunächst für die lokalen Verhältnisse die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls im Wasser bekannt sein. Dazu werden mithilfe einer Wasserschallprofilsonde Wasserschallprofile gemessen. Für die bathymetrischen Messungen kommen unterschiedliche Bautypen von Echoloten zum Einsatz, deren Funktionsweise beispielsweise in /Lurton 2010/ erklärt wird. Einstrahl-Echolote (Single-beam Echo Sounder, SBES) senden einen einzelnen Schallkegel aus und bestimmen somit nur eine einzelne Tiefe für die damit beschallte Fläche am Gewässerboden. Mehrstrahlige Echolote, wie Fächer-echolote (Multibeam Echo Sounder, MBES), können hingegen mit ihren kombinierten Sende-/Empfangseinheiten (Transceivern) einen deutlich breiteren Bereich des Gewässergrunds erfassen. Durch einen einzelnen Transceiver kann bereits ein Querprofil mit einem Öffnungswinkel von 130° oder größer erfasst werden. Bei einer Kombination von mehreren Transceivern zu einem Multi-Head-System kann sogar ein noch breiteres Profil erfasst werden, wobei dessen Öffnungsbereich von der Ausrichtung der einzelnen Transceivern zueinander abhängt.

Da das Fächerecholot die bathymetrische Daten in Form von Querprofilen erfasst, ist es für die Weiterverarbeitung dieser Daten wichtig, eine auch zeitlich exakte Georeferenzierung durchzuführen.

Nur wenn die räumlichen Orientierungswinkel und die Koordinaten des Zentrums der Transceiver zu jeder Messepoche in einem übergeordneten bzw. ortsfesten Koordinatensystem vorliegen, kann eine dreidimensionale Darstellung des Gewässergrunds abgeleitet werden. Dazu ist in allen Fällen eine Positionsgenauigkeit von besser als 1 dm in der Höhenkomponente und besser als 3 dm in der Lage einzuhalten. Angestrebt wird eine Positionsgenauigkeit von wenigen Zentimetern in allen Komponenten. Um dies zu erreichen, wird auf dem Vermessungsschiff ein Multi-Sensor-System zur Bestimmung der räumlichen Orientierung und der Position des Vermessungsschiffs installiert. Während die räumliche Orientierung durch eine inertielle Messeinheit erfasst wird, kann die jeweilige Position eines Vermessungsschiffs in offenem Gelände durch geodätische GNSS-Empfänger bestimmt werden. Da auf Bundeswasserstraßen eine Abdeckung durch GNSS-Referenzdatenservice, wie z.B. SAPOS, vorliegt, kann prinzipiell eine RTK-Lösung mittels kinematischer Auswertung mit einer Genauigkeit von besser als 1 dm ausgegeben werden. Leider steht eine RTK-Lösung nicht immer flächendeckend zur Verfügung. Gründe hierfür sind zum einen Mobilfunklöcher, in denen keine Korrekturdaten, die für die Bestimmung einer RTK-Lösung erforderlich sind, empfangen werden können. Zum anderen sind Bundeswasserstraßen teilweise von Hindernissen, wie Brücken, Bäume, Uferbebauungen, steile Hänge etc., umgeben. Durch sie werden GNSS-Signale abgeschattet, sodass teilweise keine GNSS-Lösung bestimmt werden kann oder dass durch eine ungünstige Satellitenkonfiguration nur eine unzureichende Positionsgenauigkeit erreicht wird. Zudem können durch die Hindernisse Mehrwege-Effekte verursacht werden, die ebenfalls zu einer verminderten Positionsgenauigkeit führen. Um auch in solchen problematischen Gebieten eine Positionslösung bereitstellen zu können, muss das Multi-Sensor-System erweitert werden. Aus diesem Grund werden hier verschiedene Optionen für solch eine Erweiterung vorgestellt.

## 2 POSITIONSBESTIMMUNG MIT HYDROS

Im Projekt „Entwicklung von Echtzeit- und Postprocessingverfahren zur Verbesserung der bisherigen Ortung mit Global Navigation Satellite Systems (GNSS) durch Kombination mit weiteren Sensoren sowie hydrologischen Daten“ wurde in einer Kooperation zwischen der Bundesanstalt für Gewässerkunde und dem Institut für Ingenieurgeodäsie der Universität Stuttgart die Eignung von unterschiedlichen Sensoren zur Verbesserung der Positionslösung untersucht und damit ein integriertes hydrographisches

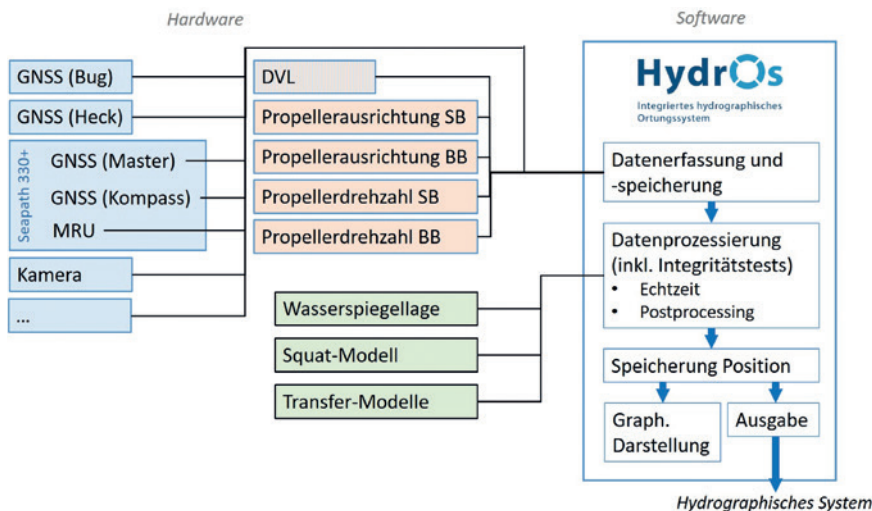


Abb. 1 | Ablauf der Datenerfassung und -prozessierung in HydrOs

Ortungssystem (HydrOs) entwickelt. Der allgemeine Aufbau des dabei untersuchten Multi-Sensor-Systems sowie der Datenfluss sind in Abb. 1 schematisch dargestellt /Breitenfeld et al. 2015/, /Scheider et al. 2016/. Die Messdaten der hier blau hinterlegten Instrumente/Sensoren, d.h. GNSS-Empfänger und Motion Rotation Unit (MRU) sowie, als optionale Ergänzung, einer Kamera, gehen bei der Datenprozessierung als zu verbessernde Beobachtungsgrößen ein. Im Fall dieser Sensoren werden z.B. Positionsinformationen, die räumlichen Orientierungswinkel, dreidimensionale Geschwindigkeitskomponenten und Drehraten ausgegeben (Tab. 1). Bei den Messungen der in Abb. 1 orange hinterlegten Sensoren hingegen handelt es sich um die Erfassung von Größen, die direkten Einfluss auf den Bewegungszustand des Schiffs nehmen (potenzielle Stellgrößen). Insbesondere sind hier die Propellerdrehzahlen der beiden Ruderpropeller oder die abgeleitete Strömungsgeschwindigkeit des Wassers zu nennen. Darüber hinaus werden verschiedene Informationen, wie beispielsweise die Wasserspiegellage, aus einer Datenbank abgegriffen und bei der Datenprozessierung integriert.

eigens zu definierenden Schiffskoordinatensystem ( $\mathbf{x}^B$ ) vermessungstechnisch bestimmt werden /Brüggemann 2014/. Sind diese bekannt, kann bei der Datenprozessierung eine Transformation der erfassten Größen auf einen in der HydrOs-Software frei definierbaren Referenzpunkt RP erfolgen. In Abhängigkeit vom installierten hydrographischen Messsystem bietet sich hierfür generell die Position des inertial-messenden Systems oder eines Transceivers des Fächerecholots an. Bei den im Rahmen der Erprobung durchgeführten Messfahrten wurde hier die erste Variante realisiert.

## 2.1 Hardware: Multi-Sensor-System

Um kurze Abschattungsbereiche ohne GNSS-Signalempfang überbrücken zu können, sind auf dem Peilschiff Mercator bereits zwei unabhängig voneinander arbeitende, geodätische GNSS-Empfänger installiert. Einer dieser Empfänger befindet sich am Bug, der zweite im hinteren Bereich des Schiffs (Abb. 2). Das gekoppelte

| Beobachtungsgrößen                                                        | Symbol                                  | Erfassender Sensor         | Genauigkeiten                                      |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------|
| Drehraten (um die Achsen des Schiffskoordinatensystems)                   | $\omega_x^B, \omega_y^B, \omega_z^B$    | MRU                        | 0,01°                                              |
| Geschwindigkeitskomponenten in Achsrichtung des Schiffskoordinatensystems | $v_x^B, v_y^B, v_z^B$                   | MRU, DVL                   | 3 cm/s bzw. 0,4 cm/s (bei $v = 3$ m/s)             |
| Geschwindigkeitskomponenten relativ zum Wasser                            | $v_{rel,x}^B, v_{rel,y}^B, v_{rel,z}^B$ | DVL                        | $\pm 0,1$ cm/s $\pm 0,2$ % (bei $v = 3$ m/s)       |
| Absolute Geschwindigkeit über Grund (Betrag)                              | $SOG^B$                                 | 3 x GNSS-Empfänger         | k. A.                                              |
| Hub                                                                       | $h v$                                   | MRU                        | 5 cm bzw. 5 %                                      |
| Kurs über Grund                                                           | $COG$                                   | 3 x GNSS-Empfänger         | k. A.                                              |
| Orientierungswinkel (Roll, Pitch, Heading)                                | $\varphi, \theta, \psi$                 | MRU + GNSS-Kompass         | 0,01°; 0,01°; 0,04°                                |
| Position (Rechtswert, Hochwert, ellipsoidische Höhe)                      | $E^N, N^N, h^N$                         | 3 x GNSS-Empfänger, Kamera | GNSS: 1 cm + 1,6 ppm (Lage), 2 cm + 3,2 ppm (Höhe) |
| Ausrichtung der Ruderpropeller (Steuerbords und Backbords)                | $\delta_{SB}, \delta_{BB}$              | Amperemeter/Messeinheit    | k. A.                                              |
| Drehzahl der Ruderpropeller (Steuerbords und Backbords)                   | $n_{SB}, n_{BB}$                        | Amperemeter/Messeinheit    | k. A.                                              |

Tab. 1 | Beobachtungs- und Stellgrößen im Multi-Sensor-System nach /Breitenfeld et al. 2015/ und /Scheider et al. 2016/ mit den von den Herstellern (Kongsberg, Teledyne RD Instruments) angeführten Genauigkeitsangaben

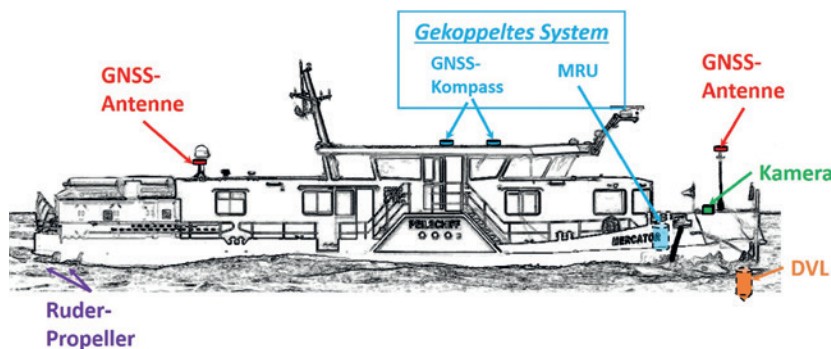


Abb. 2 | Peilschiff Mercator mit dem installierten Multi-Sensor-System /Bild: BfG/

GNSS/Inertial-System Kongsberg Seapath 330+ umfasst zwei weitere geodätische GNSS-Empfänger, für die jedoch nur für eine der beiden GNSS-Antennen eine Positionslösung ausgegeben wird. Mithilfe der beiden GNSS-Antennen kann der Seapath 330+ jedoch die Funktion eines GNSS-Kompass wahrnehmen und zu jeder Epoche  $t_k$  das Heading  $\psi_k$  bestimmen. Weiterhin beinhaltet der Seapath 330+ eine Motion Rotation Unit (MRU), die neben der Ausgabe eines dreidimensionalen Geschwindigkeitsvektors (Längs-, Quer- und Vertikalrichtung) und der Drehraten um die Achsen des Sensorkoordinatensystems auch die Verfügbarkeit des aktuellen Roll- und Pitchwinkels ermöglicht (Tab. 1). Zudem wird die Beobachtungsgröße Hub bestimmt. Bei dieser Größe handelt es sich um die zweifach integrierte Beschleunigung in Vertikalrichtung und damit um eine Höhenablage zur vom Wellengang bereinigten, mittleren Wasserspiegellage.

Als zusätzlicher Geschwindigkeitssensor ist im Zuge des Projekts HydrOs ein Doppler Velocity Log (DVL) eingebaut. Dieser unter Wasser angebrachte Sensor führt hydro-akustische Messungen durch, bei denen gleichzeitig vier Schallkegel ausgesendet werden (Abb. 3). Jedes der ausgesendeten Schallsignale wird reflektiert und zum Instrument zurückgestreut. Die aufgrund der Schiffsbewegung entstehende Dopplerverschiebung der Signalfrequenz wird u.a. zur Bestimmung der Fahrtgeschwindigkeit herangezogen. Aus den vier zu einem Messzeitpunkt bestimmten Frequenzverschiebungen kann ein dreidimensionaler Geschwindigkeitsvektor mit Komponenten in Längs-, Quer- und Vertikalrichtung abgeleitet werden /de Jong et al. 2002/. /de Jong et al. 2002/ empfehlen die Anbringung des

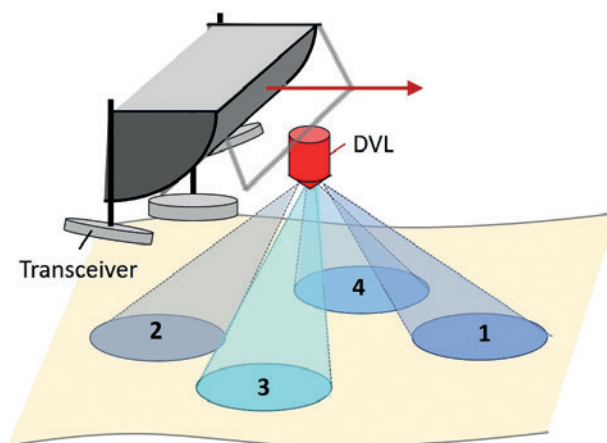


Abb. 3 | Messkonfiguration eines Doppler Velocity Logs (DVL)

Sensors in einer Weise, bei der ein jeweils um den Winkel  $\alpha$  geneigtes Transceiver-Paar (Janusanordnung) in Schiffs-längs-richtung und eine zweite Janussystem in Querrichtung ausgerichtet ist. Solch eine Ausrichtung vereinfacht die Kompensierung der Roll- und Pitchbewegung des Schiffs bei der Berechnung der aktuellen Geschwindigkeit /de Jong et al. 2002/. Viele DVL detektieren nicht nur das am Gewässergrund zurückgestreute Signal, sondern auch Reflexionen an Partikeln im Wasser, die sich in einem vorab definierten

Tiefenbereich (Wasserzelle) befinden. Damit wird die Geschwindigkeit des DVL relativ zum Wasser ebenfalls als Geschwindigkeitsvektor bestimmt. Durch Differenzbildung zwischen den beiden Geschwindigkeitsvektoren können dreidimensionale Informationen über die Strömungsgeschwindigkeit bzw. -richtung abgeleitet werden. Mithilfe dieser Größen kann bereits eine der auf das Peilschiff einwirkenden Kräfte, die Strömung, betrachtet werden.

Außerdem wird das Bewegungsverhalten des Schiffs stark von den durch die Schiffssteuerung ausgewirkten Kräften beeinflusst. Da die Mercator von zwei um  $360^\circ$  rotierbaren Ruderpropellern angetrieben wird, können diese Kräfte bei bekannter Ausrichtung und Drehzahl der beiden Propeller approximiert werden. Da diese Größen standardmäßig nicht in Form von abgreifbaren Größen vorliegen, wurden auf der Mercator Amperemeter angebracht, die diese Größen aus dem internen Steuerungssystem des Schiffs abgreifen können. Über Analog-Digital-Wandler werden sie in digitale Größen umgewandelt. Die dazu benötigten Transferfunktionen werden in speziellen Kalibrierfahrten bestimmt. Hierbei werden für vorgegebene Drehzahlen und Propellerrichtungen die jeweiligen Stromstärken erfasst, sodass jeweils eine quadratische Polynomfunktion definiert werden kann.

Über Wasser können mit der Kamera Fotos aufgenommen werden. Vor allem in der direkten Umgebung von abschattenden Bauwerken (z.B. Brücken oder Uferbauwerken), die keine uniformen Texturierungen aufweisen, kann die Position und die räumliche Orientierung (Orientierungswinkel) der Kamera bezüglich des Navigationskoordinatensystems  $\mathbf{x}^N$  in Form der Parameter der äußeren Orientierung abgeleitet werden /Luhmann 2010/. Dabei kommt ein Structure-from-Motion-(SfM-)Ansatz, der beispielsweise in /Cefalu & Fritsch 2014/ dargestellt ist, zum Einsatz. Während die Orientierungswinkel gegenwärtig nicht weiterverwendet werden, werden die bestimmten Positionskoordinaten der Kamera als Beobachtungsgrößen in die HydrOs-Software (Auswertung im Postprocessing) eingelesen. Unter Verwendung der Position der Kamera im Schiffskoordinatensystem  $\mathbf{x}^B$  kann so ein funktionaler Zusammenhang mit den zu ermittelnden Koordinaten des Referenzpunkts RP abgebildet werden. In einer ersten Untersuchung wird der Uferbereich des Rheins bei Duisburg mit einer Kamera (Canon EOS 600D) erfasst. Die Bilderfassungsrate ist in Abhängigkeit von der maximalen geplanten Fahrtgeschwindigkeit und der zu erwartenden maximalen Distanz zu den erfassbaren Objekten am Ufer so zu wählen, dass eine ausreichende Überlappung zwischen den einzelnen Bildern gewährleistet ist.

## 2.2 HydrOs-Software

Alle Sensoren sind an einen zentralen Rechner angeschlossen, wo die jeweils ausgegebenen Beobachtungsgrößen (Tab. 1) in der eigens implementierten HydrOs-Software gespeichert und verarbeitet werden. Als Erfassungsrate ist in den angegebenen Beispielen 10 Hz gewählt. Da nicht alle Sensoren einen eigenen (synchronisierten) Zeitstempel erzeugen, werden am Rechner eingehende Daten mit einem solchen versehen. Dazu wird die Rechneruhr laufend mit der GPS-Zeit synchronisiert. Da innerhalb der Software die eingehenden Datenformate definiert werden können, kann sie prinzipiell auch für weitere Sensoren eingesetzt werden, die ebenfalls einzelne der in Tab. 1 aufgeführten Messgrößen erfassen.

Für die Auswertung der beobachteten Daten wird prinzipiell ein zeitdiskretes Erweitertes Kalman-Filter (EKF) /Schmidt 1966/ eingesetzt, das sowohl für den Einsatz in Echtzeit (bzw. Echtzeitznähe) als auch für das Postprocessing der Messdaten angewendet werden kann. Hierbei werden für jede Filterungsperiode u.a. die Position des Schiffs und dessen räumliche Orientierung optimal geschätzt. Basierend auf den Zwischenergebnissen des EKF kann im Postprocessing mit dem Rauch-Tung-Striebel Smoother /Rauch et al. 1965/ zudem eine weitere Filter-Option aktiviert werden. Hierbei wird die bereits durch das EKF gewährleistete Filterung der zeitlich aufeinanderfolgenden Epochen (Vorwärtsfilterung) durch einen zeitlich rückwärts laufenden Algorithmus ergänzt, wodurch eine Glättung der geschätzten Größen erreicht wird und eine mögliche Positionsdrift in Bereichen ohne zuverlässige RTK-Lösung abgemildert werden kann /Breitenfeld et al. 2015/.

Um sicherzustellen, dass in den betrachteten Größen keine Ausreißer enthalten sind, kommt innerhalb des Filteralgorithmus ein innovationsbasierter Ausreißertest nach /Pelzer 1987/ und /Ramm 2008/ zum Einsatz. Auf Grundlage der u.a. von /Caspary & Wang 1998/ und von /Heunecke et al. 2013/ dargestellten Bestimmung der Residuen im EKF werden Ausreißer in den Beobachtungsgrößen bzw. Unverträglichkeiten in den geschätzten Zustandsgrößen  $\hat{\mathbf{x}}_k$  oder der angenommenen Varianzkomponente  $\sigma_{w,i}$  des Störanschens in  $\Sigma_{ww,k}$  aufgedeckt. Durch eine Anpassung der Varianzkomponenten  $\sigma_{w,i}$  mithilfe der adaptiven Varianzkomponentenschätzung kann solch eine Unverträglichkeit behoben werden /Breitenfeld et al. 2015/, /Artz et al. 2016/. Ausreißer im Beobachtungsvektor führen zur Eliminierung der entsprechenden Beobachtungsgröße. In beiden Fällen findet iterativ eine Neuberechnung der Zustandsgrößen für diese Epoche  $k+1$  statt, bis alle Unverträglichkeiten beseitigt sind.

Um mögliche Ausreißer in den von den GNSS-Empfängern bereitgestellten Beobachtungsgrößen bereits frühzeitig auszuschließen, werden alle Größen, für die nur eine Code-Lösung vorliegt, direkt beim Aufstellen des Beobachtungsvektors  $\mathbf{l}_{k+1}$  eliminiert. Sind potenzielle Hindernisse, die den GNSS-Signalempfang negativ beeinflussen, bereits im Voraus koordinatenmäßig bekannt, so können GNSS-Positionen, die nahe an solch einem Hindernis liegen, ebenfalls vernachlässigt werden. Hierzu wird ein Umringspolygon in einem definierbaren Abstand zum Hindernis definiert (Geofencing). Der Abstand selbst ist in Abhängigkeit von der Form und der Höhe des Hindernisses zu wählen, sollte aber mindestens 5 m betragen.

## 3 AUSWERTUNGSMODELLE

Die von den Sensoren erfassten Größen werden aus den eingehenden Datenformaten extrahiert und in einem Filteralgorithmus prozessiert. Hierfür werden die in /Breitenfeld et al. 2015/, /Scheider et al. 2016/ und /Scheider 2020/ präsentierten Prädiktions- und Beobachtungsmodelle verwendet. Als Zustandsgrößen werden

- die Drehraten im dreidimensionalen Vektor  $\hat{\boldsymbol{\omega}}_k^B$ ,
- der ebenfalls dreidimensionale Geschwindigkeitsvektor  $\hat{\mathbf{v}}_k^B$ ,
- die räumlichen Orientierungswinkel  $\hat{\boldsymbol{\Theta}}_k^{B,N}$  (Rollwinkel  $\hat{\varphi}_k^{B,N}$ , Pitchwinkel  $\hat{\phi}_k^{B,N}$ , Heading  $\hat{\psi}_k^{B,N}$ ),
- die Position  $\hat{\mathbf{p}}_{RP,k}^N$  am definierten Referenzpunkt (Rechtswert  $\hat{E}_{RP,k}^N$ , Hochwert  $\hat{N}_{RP,k}^N$  und ellipsoidische Höhe  $\hat{h}_{RP,k}^N$ ) und
- die vertikale Ablage  $\hat{\Delta H}_{WL,Model,k}$  zwischen der Höhe  $\hat{h}_{RP,k}^N$  und der Wasserspiegellage  $H_{WL,Model,k+1}$ , die aus einem flusshydrologischen Modell abgegriffen wird,

eingeführt /Breitenfeld et al. 2015/. Während sich die Orientierungswinkel  $\hat{\boldsymbol{\Theta}}_k^{B,N}$  und die Position  $\hat{\mathbf{p}}_{RP,k}^N$  auf ein für die gesamte Fahrt gültigen Navigationskoordinatensystem ( $\mathbf{x}^N$ ) beziehen, erfolgt die Angabe von  $\hat{\boldsymbol{\omega}}_k^B$  und  $\hat{\mathbf{v}}_k^B$  im Schiffskoordinatensystem ( $\mathbf{x}^B$ ).

### 3.1 Prädiktionsmodell

Um aus den zu einem Zeitpunkt  $t_{(k+1)}$  erfassten Messdaten eine zutreffende Aussage über den Bewegungszustand des Schiffs ableiten zu können, wird allgemein der Systemzustand  $\bar{\mathbf{x}}_{k+1}$  aus dem zur Epoche  $t_k$  bestimmten Zustandsvektor  $\hat{\mathbf{x}}_k$ , den Stellgrößen  $\mathbf{u}_k$  (z.B. Propellerdrehzahl, Propellerausrichtung) und nicht modellierten Einflussfaktoren  $\mathbf{w}_k$  (Störgrößen) prädiziert. Obwohl das Bewegungsverhalten eines Schiffs im Allgemeinen durch ein nichtlineares Prädiktionsmodell,

$$\bar{\mathbf{x}}_{k+1} = \hat{\mathbf{x}}_k + \phi(\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k) = \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k), \quad (1)$$

beschrieben wird, muss dieses für eine Integration ins stochastische Modell des EKFs durch eine Taylorreihen-Entwicklung linearisiert werden. Wird die Reihenentwicklung nach den Termen erster Ordnung abgebrochen und das linearisierte Modell zusammengefasst, so lässt sich der Übergang von Epoche  $t_k$  zu  $t_{k+1}$  für die wahren Größen  $\tilde{\mathbf{x}}_k$  und  $\tilde{\mathbf{u}}_k$  durch

$$\tilde{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{T}_{k+1,k} \cdot \tilde{\mathbf{x}}_k + \mathbf{B}_{k+1,k} \cdot \tilde{\mathbf{u}}_k + \mathbf{C}_{k+1,k} \cdot \mathbf{w}_k \quad (2)$$

approximieren, wenn  $\mathbf{w}_k$  angepasst wird /Ramm 2008/. Die daraus bestimmte Transitionsmatrix  $\mathbf{T}_{k+1,k}$ , die Stellgrößenmatrix  $\mathbf{B}_{k+1,k}$  und die Störgrößenmatrix  $\mathbf{C}_{k+1,k}$  wiederum kommen im stochastischen Modell bei der Bestimmung der Kovarianzmatrix der prädizierten Zustandsgrößen,  $\Sigma_{\bar{\mathbf{x}},k+1}$  zum Einsatz. Wie von /Eichhorn 2005/ und /Ramm 2008/ vorgeschlagen wird, werden Störgrößen bei der Prädiktion in Gl. (1) mit dem Erwartungswert  $\mathbf{E}(\mathbf{w}_k) = \mathbf{0}$  ersetzt.

Ein Teil des Prädiktionsmodells behandelt die Prädiktion der Drehraten- und der Geschwindigkeitskomponenten ( $\hat{\omega}_{k+1}^B, \hat{v}_{k+1}^B$ ), mit deren Hilfe die Position von RP und die räumliche Orientierung des Schiffs bestimmt werden. Da bei Messfahrten auf Binnenwasserstraßen ein möglichst gleichförmiges Bewegungsverhalten des Vermessungsschiffs angestrebt wird, ändern sich diese Zustandsgrößen im Allgemeinen nur geringfügig bzw. langsam und über einen längeren Zeitraum. Somit können diese Zustandsgrößen in einem Grundmodell vereinfacht als konstant angenommen werden /Breitenfeld et al. 2015/. Um jedoch auch eventuell auftretende Beschleunigungsvorgänge im Modell berücksichtigen zu können, die beispielsweise durch einmündende Flüsse verursacht werden, werden in /Scheider 2020/ die Drehraten- bzw. Geschwindigkeitsänderungen aus Stellgrößen modelliert,

$$\hat{\omega}_{k+1}^B = \hat{\omega}_{k+1}^B + \Delta \omega_k^B(u_k), \quad (3)$$

$$\hat{v}_{k+1}^B = \hat{v}_{k+1}^B + \Delta v_{k+1}^B(u_k). \quad (4)$$

Dabei wird untersucht, ob sich  $\Delta \omega_k^B(u_k)$  und  $\Delta v_k^B(u_k)$  nicht nur aus den gemessenen Beschleunigungen bzw. den bestimmten Drehratenänderungen, sondern auch aus Kenngrößen der Schiffssteuerung und Umgebungsinformationen ableiten lassen. In diesem zweiten Modellansatz werden die auftretenden Änderungen auf die einwirkenden Kraftkomponenten (Schiffssteuerung/-antrieb, Strömung, Wellen etc.) zurückgeführt, welche wiederum durch die erfassten Stellgrößen  $u_k$  ausgedrückt werden können. Hierbei handelt es sich zum einen um die Propellerdrehzahlen  $n_k$  und -ausrichtungen  $\delta_k$ , und zum anderen um die Strömungsgeschwindigkeiten  $\delta_{str,k}$ , die aus DVL-Messungen abgeleitet werden.

Anhand einer Kreuzkorrelationsanalyse kann gezeigt werden, dass die in Richtung der Längsachse ( $x^B$ -Achse) bzw. der Querachse ( $y^B$ -Achse) des Schiffskoordinatensystems wirksame Anteile der Propellerdrehzahlen  $n_i$  ( $i = SB, BB$ ) deutlichen Einfluss auf Änderungen in den Beobachtungsgrößen  $v_{x,k}^B, v_{y,k}^B$  und  $\omega_{z,k}^B$  haben

/Breitenfeld et al. 2015/, /Scheider 2020/. /Scheider 2020/ weist hier maximale Kreuzkorrelationskoeffizienten von 0,8 und größer nach. Um den Zusammenhang funktional abbilden zu können, wird zunächst mittels Regressionsanalyse eine Übertragungsfunktion bestimmt. Unter Einbeziehung dieser Funktion wird der Propeller Einfluss  $f$  ausgedrückt /Scheider 2020/. Dieser wird als proportional zur Antriebskraft angenommen. Exemplarisch wird in Abb. 4 der in  $x^B$ -Richtung wirksame Anteil von  $f$  (rot) im Vergleich zur Beobachtungsgröße  $v_x^B$  (blau) dargestellt. Die zu einer Epoche  $t_k$  wirkenden Komponenten  $f_k$  verursachen über mehrere nachfolgende Epochen hinweg eine Beschleunigung. Diese setzt jedoch erst nach einer Totzeit  $T_t$  ein, welche in Abb. 4 grün markiert ist. Um die in jeder Epoche wirkenden Beschleunigungen im Prädiktionsmodell beschreiben zu können, wird in /Breitenfeld et al. 2015/ und /Scheider 2020/ die numerische Ableitung von  $f$ ,  $\Delta f_{k+1,k}$ , herangezogen. Die Änderung der Geschwindigkeit  $\Delta v_{x,sk}^B, \Delta v_{y,sk}^B$  und der Drehraten  $\Delta \omega_{z,sk}^B$  für einen Zeitpunkt  $t_{sk}$  lässt sich damit aus den in den vergangenen  $m$  Epochen wirksamen Stellgrößen  $n_{(i,k-l)}$  und  $\delta_{(i,k-l)}$  ( $l = 1, \dots, m$ ) bzw. als Summe der daraus berechneten Änderungen der jeweiligen Zustandsgröße,

$$\dot{x}(t) = \frac{K}{T_1} \cdot \Delta f_i \cdot e^{-\frac{(t-T_i)}{T_1}} \quad (5)$$

bestimmen. Zu diesem Zweck muss neben  $T_t$  die Zeitkonstante  $T_1$  und der Proportionalitätsbeiwert  $K$  experimentell bestimmt werden. Letzterer gibt den Zusammenhang zwischen der Änderung in einer Komponente  $\Delta f_i$  und der daraus resultierenden Änderung in der jeweiligen Geschwindigkeitskomponente an, was in Abb. 4 beispielhaft gezeigt wird.

Als weiterer Einflussfaktor auf das Bewegungsverhalten des Schiffs werden die lokalen Strömungsverhältnisse angesehen. Die Strömungsgeschwindigkeit in direkter Nachbarschaft zum Schiff kann aus den Messgrößen des DVLs abgeleitet werden,

$$v_{str,k}^B = v_k^B - v_{rel,k}^B = [v_{x,k}^B, v_{y,k}^B, v_{z,k}^B]^T - [v_{rel,x,k}^B, v_{rel,y,k}^B, v_{rel,z,k}^B]^T, \quad (6)$$

wodurch sie im Prädiktionsmodell in Form von drei Stellgrößen eingeführt werden kann, die eine Änderung in den Zustandsgrößen  $\hat{v}_k^B$  bewirken. Da die weiteren Einflussgrößen (z.B. Wellen, hydrodynamische Kräfte etc.) hier nicht isoliert voneinander betrachtet werden können, führt /Scheider 2020/ einen kumulierten Beschleunigungseinfluss ein, der die Auswirkungen von allen nicht explizit modellierbaren Einflussgrößen zusammenfasst. Dieser verbleibende Anteil zeigt meist eine periodische Form.

## 3.2 Beobachtungsmodell

Der Zusammenhang zwischen den prädierten Zustandsgrößen und den

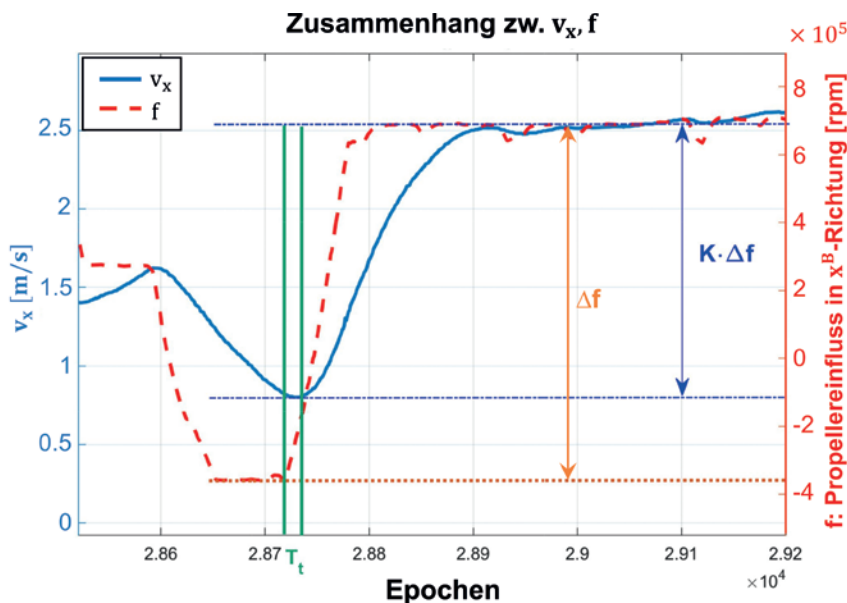


Abb. 4 | Reaktion in der Längsgeschwindigkeit  $v_k$  (blau) auf eine erfolgte Änderung des vom Propeller in Längsrichtung bewirkten Einflusses  $f$  (rot; Skala rechts)

Beobachtungsgrößen wird durch das Beobachtungsmodell

$$I_{k+1} = a(\bar{\mathbf{x}}_{k+1}) + \varepsilon_{k+1} \quad (7)$$

hergestellt, wobei  $a(\bar{\mathbf{x}}_{k+1})$  die Beobachtungsfunktion darstellt.  $\varepsilon_{k+1}$  repräsentiert das Messrauschen. Für die Integration ins stochastische Modell des EKF wird auch für das Beobachtungsmodell eine Linearisierung bis zu den Termen erster Ordnung durchgeführt,

$$I_{k+1} = \mathbf{A}_{k+1} \bar{\mathbf{x}}_{k+1} + \varepsilon_{k+1}, \quad (8)$$

wobei die Konfigurationsmatrix  $\mathbf{A}_{k+1}$  gebildet wird. Um die Beobachtungsgrößen in der stochastischen Modellierung berücksichtigen zu können, wird zudem aus den in Tab. 1 angeführten Genauigkeitsangaben bzw. aus empirisch bestimmten Standardabweichungen die Varianz-Kovarianzmatrix der Beobachtungsgrößen  $\Sigma_{II}$  gebildet.

Da fast alle Zustandsgrößen direkt beobachtet werden, muss in diesen Fällen lediglich eine Transformation vom Sensorstandpunkt auf den definierten Prädiktionspunkt (RP) durchgeführt werden. Eine Ausnahme stellen die Beobachtungsgrößen  $SOG_{k+1}$ ,  $COG_{k+1}$ , und  $h\nu_{k+1}$  dar. Während sich erstere im Beobachtungsmodell als absolute Geschwindigkeit über Grund mit den Geschwindigkeitskomponenten in  $\bar{\mathbf{v}}_{k+1}^B$  darstellen lässt, wird zur Angabe des Kurses auch das um die Meridiankonvergenz bereinigte Heading  $\psi_{k+1}^{B,N,C}$  benötigt.

Zur Verarbeitung der Beobachtungsgröße Hub ( $h\nu_{k+1}$ ) ist die Einbindung von weiteren Modellen erforderlich (Abb. 5). Ein Zusammenhang mit der als Zustandsgröße am Punkt RP ( $x_{RP}^B, y_{RP}^B, z_{RP}^B$ ) prädizierten Höheninformation  $\bar{h}_{RP,k+1}$  kann nur bei einer bekannten Wasserspiegellage erfolgen /Wirth et al. 2015/. Die an der jeweiligen Schiffposition gültige Wasserspiegellage  $H_{WL, Model, k+1}$  wird aus dem flusshydrologischen Modell FLYS der BfG abgeleitet /BfG 2020/. Da die Wasserspiegellagen an vorgegebenen Flusskilometrierungspunkten bekannt sind, kann  $H_{WL, Model, k+1}$  aus den vorliegenden Modelldaten mithilfe der aktuellen Kilometrierung des Schiffs interpoliert werden. Dennoch weist die modellierte Wasserspiegellage ein Offset zum realen Wasserspiegel auf. Diese Größe wird durch die Zustandsgröße  $\Delta H_{WL, Model, k+1}$  abgebildet. Für die in /Breitenfeld et al. 2015/ dargestellte Beobachtungsgleichung

$$\begin{aligned} a_{h\nu, k+1}(\bar{\mathbf{x}}_{k+1}) = & H_{WL, Model, k+1} + \Delta H_{WL, Model, k+1} + Load \\ & + squat_{k+1} - \bar{h}_{RP, k+1}^N - [\sin \bar{\theta}_{k+1}^{B,N} \cdot (x_{MP}^B - x_{RP}^B) + \cos \bar{\theta}_{k+1}^{B,N} \\ & \cdot \sin \bar{\varphi}_{k+1}^{B,N} \cdot (y_{MP}^B - y_{RP}^B) + \cos \bar{\theta}_{k+1}^{B,N} \cdot \cos \bar{\varphi}_{k+1}^{B,N} \cdot (z_{MP}^B - z_{RP}^B)] \end{aligned} \quad (9)$$

wird außerdem ein Modell zur Bestimmung des fahrdynamischen Einsinkens während der Fahrt (Squat-Effekt) benötigt. Da der Squat-Effekt durch die in der Literatur angegebenen Formeln /Briggs 2006/, /Briggs 2009/ oft zu groß abgeschätzt wird, wird  $squat_{k+1}$  hier durch eine schiffsspezifische Polynomfunktion in Abhängigkeit von der zum jeweiligen Zeitpunkt anliegenden Schiffsgeschwindigkeit und der Kieflfreiheit unter Wasser (Under Keel Clearance,  $UKC_{k+1}$ ) berechnet. Die Bestimmung des verwendeten Flächenpolynoms wird in /Scheider et al. 2014/ und in /Breitenfeld et al.

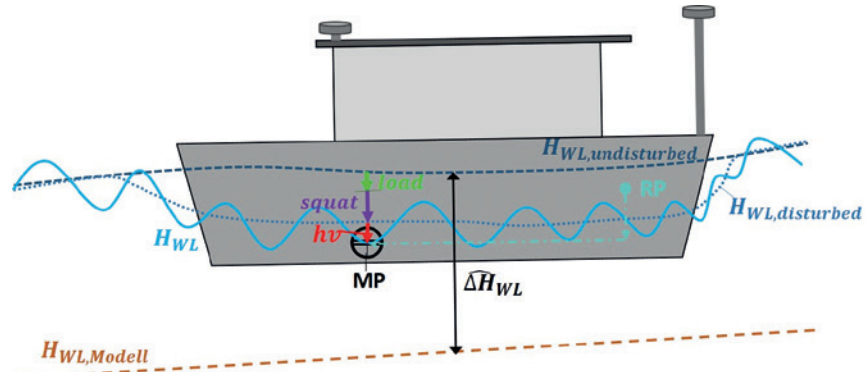


Abb. 5 | Zusammenhang zwischen der Zustandsgröße  $\bar{h}_{RP, k+1}^N$  am Referenzpunkt RP und der aus dem Wasserspiegellagemodell abgegriffenen Höheninformation  $H_{WL, Model, k+1}$ , nach /Scheider 2020/

2015/ vorgestellt.  $UKC_{k+1}$  kann hierzu vom DVL oder einem Echolot erfasst werden. Die als konstant angenommene Einsinktiefe des Schiffs aufgrund der Beladung (Load) wird manuell vor bzw. nach der Messfahrt an der Wasserspiegellagemarke MP am Schiff abgelesen. Die Koordinaten  $x_{MP}^B, y_{MP}^B, z_{MP}^B$  von MP sind bezüglich des Schiffskoordinatensystems bekannt.

Als Differenz zwischen den Beobachtungen  $I_{k+1}$  und den mithilfe des Beobachtungsmodells projizierten Zustandsgrößen  $\bar{\mathbf{x}}_{k+1}$  wird der Innovationsvektor  $\mathbf{d}_{k+1}$  eingeführt. Zur Vervollständigung des stochastischen Modells und damit zu einer Schätzung des wahren Systemzustands ( $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}$ ) wird außerdem die in Gl. (8) eingeführte Konfigurationsmatrix  $\mathbf{A}_{k+1}$  benötigt. Unter Verwendung dieser Matrix kann zunächst die Verstärkungsmatrix

$$\mathbf{K}_{k+1} = \Sigma_{\bar{\mathbf{x}}, k+1} \cdot \mathbf{A}_{k+1}^T \cdot (\Sigma_{II} + \mathbf{A}_{k+1} \Sigma_{\bar{\mathbf{x}}, k+1} \mathbf{A}_{k+1}^T)^{-1} \quad (10)$$

bestimmt werden, die zur optimalen Schätzung des Zustandvektors

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \bar{\mathbf{x}}_{k+1} + \mathbf{K}_{k+1} \cdot \mathbf{d}_{k+1} \quad (11)$$

und der zugehörigen Kovarianzmatrix  $\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}, k+1}$  benötigt wird. Eine vollständige Beschreibung des EKF findet sich beispielsweise in /Gelb 1974/ oder in /Ramm 2008/.

## 4 EVALUIERUNG

Zur Evaluierung der vorgestellten Modellansätze und Filteralgorithmen dienen mehrere Datensätze, die während verschiedener Messfahrten auf dem Rhein bei Duisburg im Jahr 2015 erfasst wurden. Um die gesamte Bandbreite der Fahrtszenarien abdecken zu können, beinhalten diese sowohl geradlinige Fahrten als auch Kurvenfahrten. Im Gegensatz zu den anderen Bestandteilen des Multi-Sensor-Systems war die Kamera lediglich an zwei Tagen im November 2015 für eine Messfahrt auf dem Rhein aufgebaut.

Zunächst wird nur ein einfaches Multi-Sensor-System, bestehend aus den GNSS-Empfängern und der MRU, betrachtet und es wird ein einfaches Prädiktionsmodell angesetzt, in dem Beschleunigungen nicht modelliert werden. Im Allgemeinen wird die Position bei Ausfall der GNSS-Lösung als Strapdown-Lösung (vgl. /Wendel 2011/) bestimmt, wobei es jedoch bei längeren Lücken zu einem Driftverhalten in der Positionslösung kommen kann. Bereits durch die Einbindung der Beobachtungsgröße  $h\nu_{k+1}$  (MRU) und eines

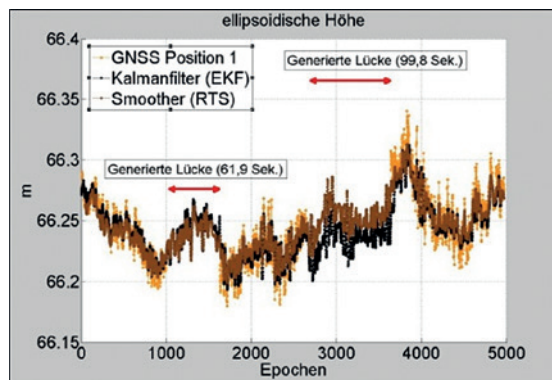


Abb. 6 | Im EKF (schwarz) und im RTS-Smoother (braun) bestimmte Zustandsgröße  $\hat{h}_{k+1}^N$  (ellipsoid. Höhe) während simulierter GNSS-Lücken /Breitenfeld et al. 2015/, /Wirth et al. 2015/

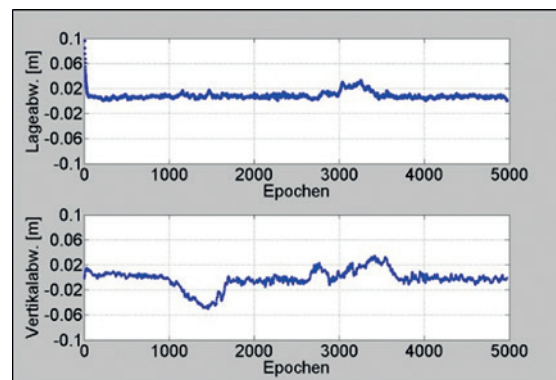


Abb. 7 | Differenz zwischen Soll-Trajektorie und den Ergebnissen aus dem RTS-Smoother für den in Abb. 6 dargestellten Fahrtabschnitt mit simulierten GNSS-Lücken /Breitenfeld et al. 2015/, /Wirth et al. 2015/

Wasserspiegellagemodells kann die Höheninformation wesentlich stabilisiert werden. Hierfür ist Gl. (9) in die Auswertung integriert. So kann die Abweichung zwischen Soll-Höhe und der Zustandsgröße  $\hat{h}_{RP,k}^N$  für eine (simulierte) GNSS-Lücke von größer als 60 s bereits bei einer Auswertung mit dem EKF auf unter 1 dm begrenzt werden (Abb. 6) /Breitenfeld et al. 2015/. Durch eine zusätzliche Anwendung des RTS-Smothers kann  $\hat{h}_{RP,k}^N$  im hier dargestellten Ergebnis zwar nur geringfügig verbessert werden (Verringerung des Maximalwerts während der 99,8 s Lücke um ca. 2 cm), dafür erreicht aber die Abweichung in den Lagekomponenten während der Fahrt einen Maximalwert von besser als 5 cm /Breitenfeld et al. 2015/. Die in einem Fahrtabschnitt exemplarisch bestimmten Abweichungen werden sind in Abb. 7 dargestellt.

Dieses Multi-Sensor-System wird in /Scheider et al. 2016/ durch eine Kamera ergänzt (siehe Abb. 1). Durch die automatische Erkennung von natürlichen oder eigens angebrachten Merkmalspunkten in zeitlich aufeinanderfolgenden Fotos mit überlappenden Bildbereichen werden die Kamerakoordinaten zum Zeitpunkt der jeweiligen Bildaufnahme bestimmt. Vor allem in Bereichen unterhalb von oder sehr nahe an baulichen Hindernissen, in denen keine zuverlässigen Positionen aus GNSS-Lösungen zur Verfügung stehen, werden die Kamerakoordinaten als zusätzliche Beobachtungen in die Datenauswertung (Postprocessing) mittels EKF integriert. Für die Bestimmung der Kamerakoordinaten im gewünschten Koordinatensystem muss eine Koordinatentransformation durchgeführt werden, wofür u.a. die Einführung eines Maßstabsfaktors erforderlich ist. Dazu wird die Software PhotoScan (Agisoft) eingesetzt. Hierbei werden zwei

unterschiedliche Herangehensweisen betrachtet: Zum einen werden koordinatenmäßig bekannte Passpunkten am Ufer verwendet, zum anderen erfolgt die Transformation mithilfe von bekannten Kamerapositionen, die vor und nach den abschattenden Hindernissen mittels GNSS-Daten referenziert werden.

Durch die Integration der so bestimmten Kamerapositionen als zusätzliche Positionsbeobachtung lässt sich die Differenz zur Soll-Trajektorie bei einer simulierten GNSS-Lücke (Brücke) von ca. 60 s gegenüber der EKF-Prozessierung ohne diese Beobachtungsgrößen verringern. Durch Ableitung der Transformationsparameter anhand von bekannten GNSS-Positionen des Schiffs können die Abweichungen für die Zustandsgrößen in der Lagekomponente bei mehreren GNSS-Lücken im EKF bereits um ca. 10 % reduziert werden /Scheider et al. 2016/. In der Höhenkomponente sind die durchschnittlichen Abweichungen mit 3,1 cm jedoch um 70 % größer /Scheider et al. 2016/. Eine deutlichere Verbesserung lässt sich erreichen, wenn die Transformationsparameter unter Verwendung von (natürlichen) Passpunkten am Ufer berechnet werden. Werden die so referenzierten Kamerakoordinaten ins EKF integriert, senkt dies bei simulierten GNSS-Lücken die Differenzen zwischen Ist- und Soll-Trajektorie auf durchschnittlich 6,5 cm in der Lagekomponente und 1,5 cm in der Höhe /Scheider et al. 2016/. Somit können auch diese zusätzlichen Beobachtungen die im EKF geschätzten Koordinaten, insbesondere in der Lagekomponente, stabilisieren.

Allgemein zeigt sich bei großer Entfernung zum Ufer, dass im von der Kamera erfassten Bildbereich jedoch nur ein schmaler Streifen mit feststehenden Objekten erfasst werden kann (Abb. 8,

rechtes Bild), wodurch die Anzahl der potenziellen Merkmalspunkte deutlich eingeschränkt ist. Durch scheinbare Texturen an der Wasseroberfläche oder in Wolkenformationen kann es zu Fehlzugeordnungen der Merkmalspunkte kommen. Vegetation am Ufer, die sich im Wind leicht bewegt, erhöht diese Fehlzugeordnungen noch. Aus diesem Grund eignen sich die aus Fotos abgeleiteten Kamerapositionen nicht für die Überbrückung von Abschattungsbereichen unter Bäumen. Da bei



Abb. 8 | Aufgenommene Fotos des Uferbereichs: mit Bebauung (links) und mit Vegetation (rechts)

Messfahrten in größeren Fahrabschnitten im Allgemeinen keine Einmessung von Passpunkten am Ufer erfolgen kann und da die Nutzung der Kamerabilder aufgrund von veränderlichen Abständen zum Ufer, von direktem Sonneneinfall oder Lichtreflexionen auf dem Wasser stark beeinträchtigt wird /Scheider et al. 2016/, lohnt sich die Integration einer Kamera ins Multi-Sensor-System lediglich in Messgebieten, die mit zahlreichen Brücken (Abb. 8, links) oder sehr hoher und flächendeckender Uferbebauung ausgestattet sind.

Neben der Integration von zusätzlichen Beobachtungsgrößen und Modellinformationen soll auch das Potenzial der Modellierung von Beschleunigungsvorgängen nach Gl. (3) und Gl. (4) im hier betrachteten Anwendungsfall nicht vernachlässigt werden. Auf eine Verwendung der Bilddaten wird hierbei verzichtet. Die Beschleunigungen werden in Form von Stellgrößen im Prädiktionsmodell berücksichtigt. Wie in Abschnitt 3.1 dargestellt, kann dies zum einen durch die Integration der von der MRU erfassten Beschleunigungen erfolgen, zum anderen kann hier eine Aufteilung in die auf das System Schiff einwirkenden Komponenten erfolgen. Hierzu werden die Messdaten, die von den in Abb. 1 orange hinterlegten Sensoren bereitgestellt werden, als Stellgrößen herangezogen. Um diese einbinden zu können, werden Beschleunigungsvorgänge bzw. die Geschwindigkeitsänderungen  $\Delta v_k^B(\mathbf{u}_k)$  bzw.  $\Delta \omega_k^B(\mathbf{u}_k)$  in /Scheider 2020/ durch eine auf Gl. (5) basierende Erweiterung des Prädiktionsmodells berücksichtigt. Bei der Auswertung der Daten zeigt sich, dass bereits die Differenzen zwischen Beobachtungsgrößen und der Zustandsgröße  $\tilde{h}_{RP,k}^N$  (Innovation) am Ende einer GNSS-Lücke bei beiden Ansätzen zur Erweiterung des Prädiktionsmodells kleiner als 10 cm sind /Scheider 2020/. Die Innovationen in den Lagekoordinaten  $\tilde{E}_{RP,k}^N, \tilde{N}_{RP,k}^N$  können jedoch ohne Verwendung des RTS-Smoother für beide Modellerweiterungen am Ende von GNSS-Lücken Werte von bis zu 14 cm annehmen /Scheider 2020/. Durchschnittlich sind die Differenzen in allen Koordinatenkomponenten kleiner als 5 cm /Scheider 2020/.

Bei einem Vergleich zwischen den prädierten Koordinaten  $\bar{p}_{RP,k+1}^N$  und den geschätzten Koordinaten  $\hat{p}_{RP,k+1}^N$  weist das Prädiktionsmodell, das die messtechnisch erfassten Beschleunigungen verwendet, gegenüber dem auf Gl. (5) basierenden Prädiktionsmodell bei einem gekrümmten Fahrtverlauf eine um 6 % geringere Lagedifferenz auf. Bei einem weitgehend geradlinigen Fahrtverlauf mit anschließendem Wendemanöver sind die Differenzen in der Lage bei Verwendung von gemessenen  $\Delta v_k^B$  bzw.  $\Delta \omega_k^B$  im Prädiktionsmodell jedoch um ca. 9 % größer als bei Verwendung der modellierten  $\Delta v_k^B(\mathbf{u}_k)$  bzw.  $\Delta \omega_k^B(\mathbf{u}_k)$ . In der Höhenkoordinate ist die Differenz im selben Fall um ca. 20 % geringer /Scheider 2020/. Da die Genauigkeiten der Stellgrößen  $\mathbf{n}$  und  $\delta$  aktuell anhand einer adaptiven Varianzkomponentenschätzung /Breitenfeld et al. 2015/ abgeschätzt werden müssen, entsprechen die mit ihnen modellierten Beschleunigungskomponenten nicht dem Genauigkeitsniveau von messtechnisch erfassten Beschleunigungskomponenten. Aus diesen Gründen ist die Verwendung von letzteren als Stellgrößen gegenwärtig zu bevorzugen. Jedoch kann auch ein Prädiktionsmodell, in dem die Beschleunigungen vernachlässigt werden, eine ausreichende Prädiktion der Koordinaten ermöglichen /Breitenfeld et al. 2015/. Im Vergleich zum Modell mit messtechnisch erfassten Stellgrößen ist die Differenz zwischen prädierten und geschätzten Zustandsgrößen jedoch in der Höhenkomponente um ca. 15 %

und in der Lagekomponente um 28 % bzw. 14 % größer. Aus diesem Grund eignet sich das klassische Prädiktionsmodell unter Berücksichtigung von Beschleunigungsinformationen inklusive des zugehörigen stochastischen Modells am besten zur Beschreibung der Systemzustände.

## FAZIT

Durch Ergänzung des bisher auf dem Peilschiff Mercator installierten Positionierungssystem, bestehend aus GNSS-Empfängern und einem gekoppelten GNSS/inertial messenden System, durch zusätzliche Instrumente und Modelle können mit solch einem Multi-Sensor-System auch in Fahrabschnitten, in denen für einzelne oder mehrere Messepochen keine RTK-Lösung verfügbar ist, qualitätsgesicherte Positionslösungen mit einer definierten Frequenz bestimmt werden. Bei der Auswertung der beobachteten Größen führt bereits die Verwendung eines vorwärts/rückwärts durchgeführten Filteralgorithmus, wie dem Rauch-Tung-Striebel-Smoother, zu einer deutlichen Verbesserung der Positionslösung im Postprocessing, selbst wenn ein einfaches Prädiktionsmodell zum Einsatz kommt, in dem Beschleunigungs- und Bremsvorgänge nicht explizit modelliert werden. Da bei der Georeferenzierung der bathymetrischen Messdaten insbesondere eine korrekte und aktuelle Höheninformation für das Fächerecholot von Bedeutung ist, zeigt sich die Bedeutung eines eingebundenen Wasserspiegellagemodells während der Datenauswertung. Die Vorgabe, dass bei einem Ausfall der RTK-Lösung von bis zu 60 s eine Lagegenauigkeit von besser als 30 cm und eine Höhengenaugkeit von besser als 10 cm mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 % erreicht werden soll, ist damit im Postprocessing erfüllt /Breitenfeld et al. 2015/. Wird das Prädiktionsmodell erweitert, um Beschleunigungen zu integrieren, so können mit den beiden hier vorgestellten Modellerweiterungen vergleichbare Koordinatendifferenzen zwischen den jeweiligen Beobachtungsgrößen und Zustandsgrößen erreicht werden.

Die Integration einer Kamera ins Multi-Sensor-System kann vor allem bei der Unterquerung von Brücken zu einer Verbesserung der Positionslösung (als Bestandteil der äußeren Orientierung) führen. Diese verbessert das Filterergebnis allerdings nur dann, wenn die Objekte in der Umgebung (z.B. Brückenpfeiler) eine ausreichend starke Texturierung aufweisen. Nur so kann in Bildfolgen eine ausreichende Anzahl von identischen Merkmalspunkten, die beim SfM-Ansatz zur Berechnung der Parameter der äußeren Orientierung benötigt werden, extrahiert werden. Da der Abstand von der Kamera zu den erfassbaren Objekten und damit der für die Merkmalserkennung nutzbare Bildbereich je nach Position des Peilschiffs auf dem Gewässer stark variiert und da in vielen Fällen problematische Beleuchtungsbedingungen herrschen, verbessert die aus den Bilddaten gewonnenen Positionsinformationen das Filterergebnis vor allem bei Vorhandensein von künstlich errichteten Objekten, wie einer flächenhaften Uferbebauung oder Brückenpfeilern.

## DANKSAGUNG

Die hier vorgestellten Modelle und Ergebnisse wurden größtenteils im Rahmen des Projekts HydrOs entwickelt. Die Autoren möchten sich bei Marc Breitenfeld und Harry Wirth (ehemals Mitarbeiter der BfG) bedanken, die an den hier vorgestellten Ergebnissen maßgeblich mitgearbeitet haben und ohne die die Realisierung des Projekts nicht möglich gewesen wäre. Weiterhin gilt unser Dank dem WSA Duisburg Rhein, das das Peilschiff Mercator für die Datenerfassung zur Verfügung gestellt hat.

## LITERATUR

- Artz, T.; Scheider, A.; Breitenfeld, M.; Brüggemann, T.; Schwieger, V.; Wirth, H. (2016): Improved Positioning of Surveying Vessels on Inland Waterways. In: Hydrographische Nachrichten (HN) 105(2016)11, 30–34.
- BfG (2020): FLYS – Flusshydrologischer Webdienst. [https://www.bafg.de/DE/08\\_Ref/M2/03\\_Fliessgewmod/01\\_FLYS/flys\\_node.html;jsessionid=8D7BC1924A85DF18D6FA490B3B3F6CA8.live21301](https://www.bafg.de/DE/08_Ref/M2/03_Fliessgewmod/01_FLYS/flys_node.html;jsessionid=8D7BC1924A85DF18D6FA490B3B3F6CA8.live21301) (19.04.2020).
- Breitenfeld, M.; Wirth, H.; Brüggemann, T.; Scheider, A.; Schwieger, V. (2015): Entwicklung von Echtzeit- und Postprocessingverfahren zur Verbesserung der bisherigen Ortung mit Global Navigation Satellite Systems (GNSS) durch Kombination mit weiteren Sensoren sowie hydrologischen Daten. BfG-Bericht BfG-1856. BfG, Koblenz.
- Briggs, M. J. (2006): Ship Predictions for Ship/Tow Simulator. Technischer Bericht, ERDC/CHL CHETN-I-72, US Army Corps of Engineers.
- Briggs, M. J. (2009): Ankudinov Ship Squat Prediction – Part I: Theory, Parameters, and FORTRAN Programs. Technischer Bericht, ERDC/CHL CHETN-IX-19, US Army Corps of Engineers.
- Brüggemann, T. (2014): Leitfaden für die Einmessung von hydrographischen Messsystemen auf Vermessungsschiffen. BfG-Bericht BfG-1822, BfG, Koblenz.
- Caspary, W.; Wang, J. (1998): Redundanzanteile und Varianzkomponenten im Kalman Filter. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 123(1998)4, 121–128.
- Cefalu, A.; Fritsch, D. (2014): Non-Incremental Derivation of Scale and Pose from a Network of relative Orientations. ISPRS Technical Commission III Symposium, 5.–7. September 2014, Zürich, Schweiz (Vol. XL-3).
- Eichhorn, A. (2005): Ein Beitrag zur Identifikation von dynamischen Strukturmodellen mit Methoden der adaptiven KALMAN-Filterung. Dissertation, Fakultät für Bau- und Umweltwissenschaften, Universität Stuttgart. DGK, Reihe C, Nr. 585, München.
- Gelb, A. (Hrsg.) (1974): Applied Optimal Estimation. The M.I.T. Press, Cambridge, MA/USA.
- Heunecke, O.; Kuhlmann, H.; Welsch, W.; Eichhorn, A.; Neuner, H. (2013): Handbuch Ingenieurgeodäsie – Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. 2. Auflage. Wichmann, Berlin/Offenbach.
- Jong, C. D. de; Lachapelle, G.; Skone, S.; Elema, I. A. (2002): Hydrography. Series on Mathematical Geodesy and Positioning. VSSD, Delft, Niederlande.
- Luhmann, T. (2010): Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 3. Auflage. Wichmann, Berlin/Offenbach.
- Lurton, X. (2010): An introduction to underwater acoustics: principles and applications. 2. Auflage. Springer Praxis Publishing, London.
- Pelzer, H. (1987): Deformationsuntersuchungen auf der Basis kinematischer Bewegungsmodelle. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 94(1987)2, 49–62.
- Ramm, K. (2008): Evaluation von Filter-Ansätzen für die Positionsschätzung von Fahrzeugen mit den Werkzeugen der Sensitivitätsanalyse. Dissertation, Fakultät für Bau- und Umweltwissenschaften, Universität Stuttgart. DGK, Reihe C, Nr. 619, München.
- Rauch, H. E.; Tung, F.; Striebel, C. T. (1965): Maximum Likelihood Estimates of Linear Dynamic Systems. In: AIAA Journal 3(1965)8, 1445–1450.

Scheider, A. (2020): Identifikation von Systemmodellen zur dreidimensionalen Zustandsschätzung eines Peilschiffs mit Propellerantrieb unter Verwendung eines Multi-Sensorsystems (als Dissertation an der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart eingereicht; noch nicht veröffentlicht).

Scheider, A.; Hassan, A.; Schwieger, V.; Breitenfeld, M.; Brüggemann, T. (2016): Erweiterte Echtzeit- und Postprocessing-Verfahren zur Optimierung der GNSS-Ortung in Abschattungsbereichen an BWaStr. BfG-Bericht BfG-1892. BfG, Koblenz.

Scheider, A.; Wirth, H.; Breitenfeld, M.; Schwieger, V. (2014): HydrOs – An Integrated Hydrographic Positioning System for Surveying Vessels. FIG Congress, 16–21 Juni 2014, Kuala Lumpur, Malaysia. [https://www.fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/fig2014/papers/ts06j/TS06J\\_scheider\\_wirth\\_et\\_al\\_7094\\_abs.pdf](https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2014/papers/ts06j/TS06J_scheider_wirth_et_al_7094_abs.pdf) (14.04.2020).

Schmidt, S. F. (1966): Applications of state space methods to navigation problems. In: Leondes, C. (Hrsg.): Advances in Control Systems, Vol. 3, 293–340.

Statista (2020): Statistiken zur Binnenschifffahrt. <https://de.statista.com/themen/673/binnenschifffahrt> (13.04.2020).

Wendel, J. (2011): Integrierte Navigationssysteme – Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation. 2. Auflage. Oldenbourg, München.

Wirth, H.; Breitenfeld, M.; Scheider, A.; Schwieger, V. (2015): HydrOs – Ein integriertes Ortungssystem kombiniert mit hydrologischen Daten. In: Hydrographische Nachrichten (HN) 101(2015)6, 6–12.

Dipl.-Ing. Annette Scheider

HAFENCITY UNIVERSITÄT HAMBURG

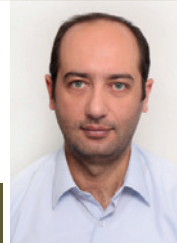
Henning-Voscherau-Platz 1 | 20457 Hamburg  
annette.scheider@hcu-hamburg.de



M. Sc. Aiham Hassan

UNIVERSITÄT STUTTGART  
INSTITUT FÜR INGENIEURGEODÄSIE

Geschwister-Scholl-Str. 24 D | 70174 Stuttgart  
aihah.hassan@iigs.uni-stuttgart.de



Dipl.-Ing. (FH) Thomas Brüggemann

BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE

Am Mainzer Tor 1 | 56068 Koblenz  
brueggemann@bafg.de



Prof. Dr.-Ing. habil.

Dr. h.c. Volker Schwieger

UNIVERSITÄT STUTTGART  
INSTITUT FÜR INGENIEURGEODÄSIE

Geschwister-Scholl-Str. 24 D | 70174 Stuttgart  
volker.schwieger@iigs.uni-stuttgart.de



Manuskript eingereicht: 23. 04. 2020 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet