

DVW Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“
Deutsche Hydrographische Gesellschaft

Hydrographie 2018 – Trend zu unbemannten Messsystemen

Beiträge zum 170. DVW-Seminar und 32. Hydrographentag
vom 12. bis 14. Juni 2018 in Lindau



Schriftenreihe des DVW
Band 91/2018

Wissenschaft
Wissen

Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

Hydrographie 2018 – Trend zu unbemannten Messsystemen

Beiträge zum 170. DVW-Seminar und
32. Hydrographentag vom
12. bis 14. Juni 2018 in Lindau

Redaktion:

Harry Wirth, Tanja Dufek, Dirk Kowalewski,
Bernd Vahrenkamp, Patrick Westfeld

Herausgeber:

DVW – Gesellschaft für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement e.V.



Schriftenreihe des DVW
Band 91
Wißner-Verlag

Herausgeber:
DVW – Gesellschaft für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement e. V.

www.dvw.de
INTERGEO®

Schriftenreihe des DVW
Band 91

Tipps zur Navigation in der PDF-Datei:

Die PDF enthält zur Navigation Lesezeichen und Hyperlinks.
Der Mausklick auf ein Lesezeichen führt zur ersten Seite des angewählten Beitrags.
Der Mausklick auf einen dunkelblau markierten Abbildungs- oder Tabellen-
verweis im Text führt zur verknüpften Abbildung oder Tabelle. Zurück zur
ursprünglichen Stelle im Text gelangt man mit dem Klick auf den dunkelblau
markierten Verweis in der Abbildungsunterschrift oder Tabellenüberschrift.
Internetadressen und E-Mail-Adressen sind ebenfalls mit Hyperlinks hinterlegt.
Kostenfreier PDF-Download unter www.geodesie.info.

Zitierhinweis:

[Nachname, Vorname]: [Titel des Beitrags]. In: DVW e.V. (Hrsg.): Hydro-
graphie 2018 – Trend zu unbemannten Messsystemen. DVW-Schriftenreihe,
Band 91, Augsburg, 2018, S. x–y.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-95786-165-8
ISSN 0940-4260

© Wißner-Verlag, Augsburg 2018
www.geodesie.info

Herstellung: Wißner-Verlag, Augsburg
Bildnachweis Cover: Martin Kurowski, Universität Rostock, Institut für Automatisierungstechnik

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede
Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen
bedarf deshalb der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlags.

Inhalt

Vorwort	5
---------	---

Session 1: Grundlagen für hydrographische Vermessungssysteme

Tanja Dufek Harald Sternberg	
Unbemannte Multisensorsysteme und Nutzungsmöglichkeiten in der Hydrographie	9
Thomas Brüggemann Thomas Artz Robert Weiß	
Kalibrierung von Multisensorsystemen	29
Anja Heßelbarth	
GNSS in der Hydrographie	47
Lars Schiller	
Fachwortschatz der Hydrographie	65

Session 2: Anwendungen im Binnenbereich

Martin Wessels Nils Brückner Pushpa Dissanayake Hilmar Hofmann Paul Wintersteller	
Tiefenschärfe – luft- und wassergestützte Vermessung des Bodensees und einige Folgeprojekte	85
Christian Mulsow Robert Kenner	
UAV-basierte Vermessung von Bergseen	99
Sven Jany	
Flugzeuggestützte hydro-bathymetrische Überwachungsmessungen in renaturierten Braunkohle-Tagebaugebieten	115
Andreas Prokoph	
Korrektur Schifffahrtsrinne Basel-Stadt – Hydrographie im Rahmen eines Infrastrukturprojektes	121

Session 3: Aufgaben im Hochsee- und Küstenbereich

Stephan Dick Luis Becker Stefan Grammann Mathias Palm Jana Vetter	
Integration von hochauflösten marinen Geodaten in elektronische Navigationssysteme	127

Inhalt

Alexander Rügamer
Stören und Täuschen von GNSS – Praxisbeispiele und deren Folgen _____ 135

Dirk Kowalewski
Bestimmung der schifffodynamischen Parameter mittels GNSS _____ 147

Session 4: Unbemannte Erfassungssysteme

Horst Hellbrück | Gunther Ardelt
Unterwasserkommunikation, Systemvernetzung und autonome
Kommunikation im Projekt BOSS _____ 159

Gerrit Meinecke
Limits von AUV und ROV bei Missionen im Hochseebereich – ein kurzer
Überblick über die Theorie, die Realität und die Risiken _____ 175

Raimund Schwermann | Christoph Effkemann | Nicole Hein | Gesa Kutschera |
Jörg Blankenbach
RiverView® – Monitoring von Gewässerparametern an kleinen und
mittleren Fließgewässern mit USV _____ 187

Hannes Sardemann
Exploration von Fließgewässern in Kleineinzugsgebieten mit UAV- und
USV gestützten Multisensorsystemen _____ 203

Wolfgang Jans | Daniel D. Sternlicht
AUVs at WTD 71 in Research & Use and Emerging Technologies in
Underwater Munitions Mapping _____ 209

Session 5: Einblicke in Wissenschaft und Zukunftstrends

Robin Rofallski | Thomas Luhmann
Fusion von Sensoren mit optischer 3D-Messtechnik zur Positionierung von
Unterwasserfahrzeugen _____ 223

Marc Hildebrandt
Erkundung und Kartographierung des Jupitermondes Europa –
Vollautonome Langzeitmissionen mit Unterwasserfahrzeugen _____ 235

Vorwort

Die Hydrographie stützt sich in der Datenerfassung schon seit einigen Jahrzehnten auf digital erfassende Multisensorsysteme. Die Qualität hing lange Zeit nicht nur von der Qualität der Sensoren ab, sondern wurde maßgeblich davon bestimmt, ob der Mensch die richtigen Entscheidungen traf und das Vermessungssystem durch entsprechende Aktionen steuerte. Zunehmend werden integrierte Systeme genutzt, die durch die Kombination der Sensordaten insgesamt zuverlässigere und präzisere Messergebnisse liefern. Ein weiterer Vorteil integrierter Systeme ist die Möglichkeit, nicht nur Ausfälle einzelner Sensoren zu überbrücken, sondern durch die intelligente Kombination der Einzelsenso- ren neue Informationen zu erzeugen. Die Digitalisierung der Messtechnik liefert außerdem die Grundlage für „intelligente“ Systeme, die ggf. autonom arbeiten, d. h. die Entscheidungen in hohem Maße ohne menschliche Mitwirkung treffen können.

Derartige unbemannte Messsysteme halten inzwischen verstärkt Einzug in unseren Alltag. Sie arbeiten zum Teil autonom oder im Verbund und versprechen in der Hydrographie eine Vergrößerung des Anwendungsspektrums, z. B. Messungen in Bereichen, die bisher aus Sicherheitsgründen nicht zugänglich waren. Auch die mit herkömmlicher Technik bisher nur mit hohem Zeiteinsatz erreichbaren Bereiche können nun mit unbemannten Messsystemen bzw. zukünftig mit autonomen Systemen effizienter erfasst werden.

Das Seminar bietet Informationen zu den Grundlagen der Datenerfassungsmethoden mit integrierten Multisensorsystemen und gibt einen aktuellen Überblick über Anwendungen mit unbemannten Messsystemen im Binnen- sowie im Hochsee- und Küstenbereich. Die Möglichkeiten und Grenzen der Technik und die neuesten Entwicklungen werden vorgestellt.

Es ist auch dieses Mal wieder gelungen, den aktuellen Trend aufzunehmen und 20 kompetente Vortragende zu gewinnen. Die Vortragsveranstaltung bildet den fachlichen Rahmen, der in bewährter Form durch eine von der DHyG organisierte Fachausstellung von Herstellern und Dienstleistern bereichert und ergänzt wird.

Die Veranstalter, der DVW-Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“ und die Deutsche Hydrographische Gesellschaft (DHyG) freuen sich darauf, mit Ihnen in Lindau anlässlich des 170. DVW-Seminars und 32. Deutschen Hydrographentags Anregungen und Gedanken zu dem innovativen Leitthema auszutauschen.

Wir bedanken uns bei allen Referenten, die durch die rechtzeitige Lieferung diesen Tagungsband mit Leben gefüllt haben und dass sie die Geduld aufgebracht

haben, sich im Vorfeld auf unsere konstruktive Kritik einzulassen, aber auch den Moderatoren der einzelnen Sessions und nicht zuletzt den Teilnehmerinnen und Teilnehmern für die Diskussionsbeiträge vor Ort.

Dem Organisationsteam Dr. Sabine Müller, Lutz Christiansen und Boris Schulze gebührt besonderer Dank für die Organisation des Seminars, der Fachausstellung und des – wie immer – ansprechenden und fachlich zur Hydrographie passenden Begleitprogramms.

Prof. Harry Wirth
Jade Hochschule
Wilhelmshaven Oldenburg Elsfleth

Dipl.-Ing. Thomas Dehling
1. Vorsitzender der DHyG

Session 1: Grundlagen für hydrographische Vermessungssysteme

Unbemannte Multisensorsysteme und Nutzungsmöglichkeiten in der Hydrographie

Tanja Dufek | Harald Sternberg

1 Einführung

Autonome oder automatisierte Alltagshilfen, wie Staubsaugerroboter oder Fahrassistenten in Autos, halten in jüngster Zeit immer mehr Einzug in unseren Alltag. Diese Entwicklung wird in den kommenden Jahren weiter zunehmen. Voll-

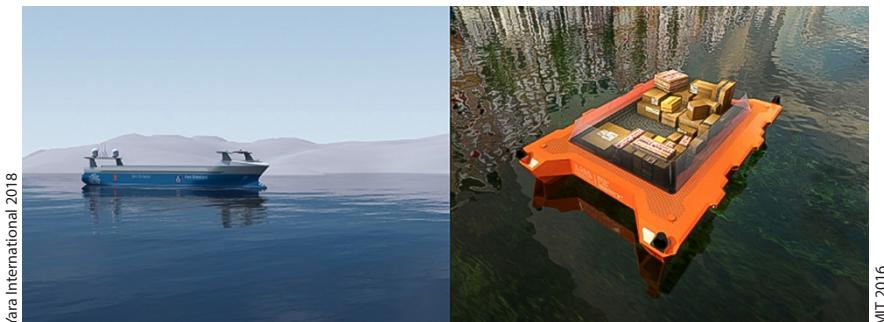


Abb. 1: Beispiele für unbemannte Transportschiffe. Links: Entwurf eines unbemannten Containerschiffs. Rechts: Roboat zum Transport auf den Kanälen Amsterdams.

ständig autonome Autos auf den Straßen scheinen nicht mehr allzu weit in der Zukunft zu liegen. Auch im maritimen Bereich befinden sich unbemannte Handelsschiffe für den autonomen Transport von Handelsgütern über die Ozeane in der Entwicklung. So wurde zum Beispiel 2015 das Forschungsprojekt *Advanced Autonomous Waterborne Applications Initiative* ins Leben gerufen (AAWA 2016). Rolls-Royce hat im Januar 2018 das *Autonomous Ship Research Development Center* in Turku, Finnland, eröffnet (Rolls-Royce 2018) und auch der norwegische Chemikalien-Hersteller Yara International entwickelt aktuell ein elektrisch betriebenes und unbemanntes Containerschiff Yara Birkeland. Dieses soll in der zweiten Hälfte 2018 fertiggestellt und zunächst bemannt, dann aber ab 2020 komplett autonom eingesetzt werden (Yara International 2018; Abb. 1). Ebenso wird im Binnenbereich an der Realisierung unbemannter Transportmöglichkeiten geforscht: Das *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) und das *Amsterdam Institute for Advanced Metropolitan Solutions* haben 2016 ein Forschungs-

projekt zur Entwicklung einer Flotte von unbemannten Booten („Roboats“) für den Transport von Gütern und Menschen in den Kanälen Amsterdams ins Leben gerufen (MIT 2016; [Abb. 1](#)).

Auch in der Hydrographie finden unbemannte Messplattformen Anwendung. Grundsätzlich werden sie dort eingesetzt, wo der menschliche Einsatz zu gefährlich bzw. nicht möglich ist, oder aus Gründen der Produktivitätssteigerung. An ihrer Entwicklung wird etwa seit dem Zweiten Weltkrieg gearbeitet (Bertram 2008). Die bedeutendsten Fortschritte fanden vor allem in den letzten 20 Jahren statt (Manley 2016).

Dieser Beitrag gibt einen allgemeinen Überblick über unbemannte Multisensorsysteme in der Hydrographie. Er befasst sich mit ihrer Definition und Unterscheidung ([Kap. 2](#)), der eingesetzten Sensorik ([Kap. 3](#)) und zeigt deren Anwendungspotenzial auf ([Kap. 4](#)). Abschließend werden die sich daraus ergebenden Vor- und Nachteile sowie Entwicklungstrends ([Kap. 5](#) und [Kap. 6](#)) adressiert.

2 Definitionen und Unterscheidung

Unter einem Multisensorsystem versteht man ein integrales System, das sich aus verschiedenen Elementen, den Sensoren, zusammensetzt und diese zusammenfasst. Ein Sensor ist nach DIN1319-1 ein (Messgrößen-)Aufnehmer und „Teil eines Messgerätes oder Messeinrichtung, der auf eine Messgröße unmittelbar anspricht“. Er ist ein technisches Bauteil, der physikalische oder chemische Eigenschaften und/oder die stoffliche Beschaffenheit der Umgebung qualitativ oder quantitativ erfassen kann (Schwieger und Sternberg 2014). Sensoren eines Systems erfassen die Umgebung gleichzeitig, stehen zueinander in Beziehung und können sich ergänzen oder kontrollieren, wenn die gewonnenen Informationen redundant sind. Daher ist die filterbasierte Datenfusionierung von redundanten Sensordaten bei Multisensoren von hoher Bedeutung, um das Potenzial des gesamten Datenpools konsequent nutzen zu können.

Aufgrund ihres simultanen Einsatzes spielt der zeitliche und räumliche Bezug der Einzelkomponenten und ihre Berücksichtigung durch Referenzierung eine wichtige Rolle für eine qualitativ hochwertige Kartierungslösung (Schwieger und Sternberg 2014). Durch Kalibrierungen lassen sich auf das Messsystem und/oder den Messvorgang wirkende Fehler modellieren, Abweichungen bestimmen und berücksichtigen. Für weiterführende Informationen sei auf den Beitrag von Brüggemann et al. (2018) in diesem Band verwiesen.

In [Kap. 2.1](#) werden die verschiedenen Arten von unbemannten Multisensorsystemen in der Hydrographie begrifflich voneinander abgegrenzt, bevor dann in [Kap. 2.2](#) auf den Begriff der Autonomie vertiefend eingegangen wird.

2.1 Unterscheidung unbemannter Multisensorsysteme in der Hydrographie

In der Hydrographie werden traditionell Schiffe, ausgestattet mit beispielsweise Echolot, Positionierungs- und Lagesensor, als Plattform für ein Multisensor-System eingesetzt. In jüngster Zeit kommen vermehrt unbemannte Plattformen unterschiedlichster Ausprägung in verschiedensten hydrographischen Anwendungsbereichen zum Einsatz. Unter dem Begriff *Unmanned Maritime Vehicle* (UMV) lässt sich die Mehrzahl dieser unbemannten Multisensorsysteme zusammenfassen. Eine weitere begriffliche Unterscheidung lässt sich bezüglich ihres Einsatzgebietes (unter oder auf dem Wasser) und dem Automatisierungsgrad der Steuerung (geschleppt, ferngesteuert, autonom) vornehmen (Abb. 2). Systeme, die unter Wasser eingesetzt werden, werden als *Unmanned Underwater Vehicles* (UUVs) bezeichnet. Hingegen werden Plattformen, die wie Schiffe auf dem Wasser eingesetzt werden, *Unmanned Surface Vehicles* (USVs) genannt.

Des Weiteren wird bei UMVs hinsichtlich des Grades der Autonomie begrifflich differenziert. Bei UUVs unterscheidet man zwischen *Remotely Operated*

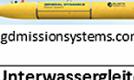
UMV – Unmanned Maritime Vehicles		UAV	Geschleppte Systeme
	UUV	Unmanned Surface Vehicle	
Remotely Operated	ROV  (openrov.com)  geomar.tv fmctechnologies.com	ASV  (ocean-innovations.net)  (maritimerobotics.com)	Unmanned Aerial Vehicle  (aibotix.com)  (riegl.com)
	AUV  (robosea.org)  (gdmissons.com)	Crawler & Plows  (helixesg.com)  (nexans.com)	Unterwassergleiter  (teledynemarine.com)
Autonomous	ASV  (liquid-Robotics.com)  (asvglobal.com)	DJI Drone  (dji.com)	

Abb. 2: Übersicht eingesetzter unbemannter Multisensorsysteme in der Hydrographie

Vehicles (ROVs) und *Autonomous Underwater Vehicles* (AUVs). Die ferngesteuerten ROVs sind in der Regel durch ein Kabel mit einem Anwender auf dem Schiff oder an Land verbunden. Über dieses Kabel wird der ROV mit Strom versorgt, erhält Steuerungsbefehle und leitet Sensordaten an den Operator weiter. Bei AUVs hingegen erfolgt während ihres Einsatzes keine oder nur sehr eingeschränkte Kommunikation mit dem Anwender über beispielsweise ein akustisches Modem oder optische Telemetrie. Sie sind somit autonom. Ihnen werden vor Beginn einer Mission die Koordinaten des geplanten Messgebietes oder Wegpunkte übermittelt. Die Navigation erfolgt selbstständig, zur Kollisionsvermeidung sind Ausweichalgorithmen implementiert.

Unterwassergleiter bilden eine spezielle Untergruppe der AUVs. Im Gegensatz zu anderen AUVs, die eine stabile Flughöhe (durch Wasser oder über den Grund) aufweisen, bewegen sich Unterwassergleiter an der Wasseroberfläche und lassen sich regelmäßig in größere Wassertiefen (in der Regel einige hundert Meter Wassertiefe) absinken. Die durch Auftriebsänderung hergestellte Vertikalbewegung wird mit Hilfe kleiner Außenflügel in Horizontalbewegung umgewandelt (Rudnick et al. 2004). Diese energiesparende Fortbewegungsmethode ermöglicht lange Einsatzzeiten von bis zu mehreren Monaten. Üblicherweise finden Unterwassergleiter in der Forschung, zur Sammlung ozeanographischer Daten, Anwendung.

Eine begriffliche Differenzierung, basierend auf dem Grad der Autonomie, kann auch bei USVs vorgenommen werden. Für autonome Oberflächenfahrzeuge wird der Begriff *Autonomous Surface Vehicle* (ASV) verwendet. USVs, die über eine Funkverbindung ferngesteuert werden, sind in der Literatur nicht explizit mit einem eigenen Begriff abgegrenzt.

UMVs lassen sich hinsichtlich ihrer Größe, Payload, Leistung und Einsatztiefe weiter in Kategorien einteilen. Am eindeutigsten definiert sind diese bei den ROVs. Dort unterscheidet man nach Christ und Wernli (2014) drei Kategorien: Observation Class ROVs (OCROV), Mid-Sized ROVs (MSROV) und Work Class ROVs (WCROV). In Tab. 1 findet sich eine Übersicht der ROV Kategorien und ihrer jeweiligen Eigenschaften.

Eine ähnliche Unterscheidung kann nach Newman et al. (2007) auch bei AUVs erfolgen in klein (< 100 kg), medium (101 bis 1000 kg) und groß (> 1000 kg) und nach Bertram (2008) bzw. dem Carderock Laboratory auch bei USVs in klein (< 1 t), medium (< 100 t), groß (< 1000 t) und sehr groß (> 1000 t), wobei bisher nur kleine oder medium USVs realisiert wurden.

Die Unterscheidung, ob es sich bei einem System um ein UUV oder USV handelt, muss nicht immer eindeutig sein, da es Systeme gibt, die sowohl auf als auch unter Wasser eingesetzt werden. Gleiches gilt auch im Hinblick auf die Autonomie (vor allem bei USVs). Es kann sich als schwierig herausstellen, eine

Tab. 1: ROV-Kategorien und charakteristische Kenndaten (Nach Christ und Wernli 2014)

Kategorie	Gewicht	Wasser-tiefen	Absatz-methode	Thruster/Werkzeug
OCROV	< 3 kg – 100 kg	± 300 m	Manuell	Elektrisch/elektrisch
MSROV	100 kg – 1000 kg	> 1000 m	Kran oder A-Rahmen	Elektrisch/hydraulisch
WCROV	> 1000 kg	> 3000 m	A-Rahmen	hydraulisch/hydraulisch

eindeutige Zuordnung zu treffen, da sie teilweise in verschiedenen Autonomiestufen verwendet werden können bzw. nur teilautonom sind.

Des Weiteren zählen *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs), sofern sie gewässerbezogene Daten erfassen, auch zu den in der Hydrographie eingesetzten Multisensorsystemen. In der Regel sind UAVs mit Kamerasystemen (evtl. verschiedener Wellenlängenbereiche) und/oder Laserscannern ausgestattet und können zum Beispiel für die Erfassung von Küstenbereichen eingesetzt werden. Durch die Verwendung eines bathymetrischen Laserabstandsmessers (Profiler) werden, unter entsprechenden Bedingungen (z. B. Trübung), Gewässerböden erfasst (Mandlburger et al. 2015). UAVs können aus technischer Sicht autonom betrieben werden; dies lässt jedoch der Gesetzgeber nicht zu, so dass ihr Einsatz stets überwacht und ein Eingriff durch den Anwender jederzeit möglich sein muss. Aufgrund des Umfangs dieses Beitrags wird auf UAVs im Folgenden nicht vertiefend eingegangen. Für weitere Informationen sei auf Beiträge in diesem Band mit UAV-Schwerpunkt sowie auf Beiträge der DVW-Seminare zum Thema UAV der vergangenen Jahre verwiesen. Des Weiteren seien an dieser Stelle ebenfalls geschleppte Systeme und Crawler bzw. Plows der Vollständigkeit halber erwähnt. Erstere finden bei der Vermessung von tieferen Gewässern Anwendung und werden üblicherweise von Schiffen gezogen. Crawler bzw. Plows werden bei Kabel- oder Pipelineverlegungen bzw. im Vorfelde bei der Vorbereitung des Untergrundes eingesetzt.

2.2 Autonomie

Wie bereits im Kap. 2.1 erwähnt, sind der Begriff der Autonomie sowie eine eindeutige Zuordnung eines UMVs zu den Kategorien *autonom* oder *ferngesteuert* nicht immer möglich. In dem Zusammenhang ist die Unterscheidung der Begriffe *Automatisierung* und *Autonomie*, deren Übergang fließend ist, wichtig. Nach DIN V 19233 ist Automatisierung das „[...] Ausrüsten einer Einrichtung, so dass sie ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen bestimmungs-

gemäß arbeitet.“ Nach Parasuraman et al. (2000) lassen sich vier Funktionsbereiche im Hinblick auf die Automatisierung unterscheiden:

- Informationssammlung
- Informationsanalyse
- Entscheidungs- und Aktionsauswahl
- Aktionsausführung

Innerhalb eines Systems kann für jeden dieser Bereiche eine unterschiedliche Stufe der Automatisierung bis hin zur Autonomie erfolgen. Ein vollständig autonomes UMV erfasst seine Umgebung, navigiert, trifft Routenentscheidungen und führt Aktionen selbstständig ohne menschlichen Eingriff durch. Man bezeichnet solche Systeme auch als operationell autonom, da das Ziel (z. B. die Festlegung des Messgebiets) vorgegeben ist und nicht durch das System erfolgt (BPB 2018).

In der Literatur findet man verschiedene Definitionen von Stufen der Autonomie (level of autonomy). Eine allgemeine Unterscheidung der Autonomiestufen bezüglich Mensch-Maschine-Interaktion geht auf Thomas Sheridan zurück (Parasuraman et al. 2000). Dort wird in zehn Stufen zwischen vollständiger Autonomie und menschlicher Steuerung unterschieden (Tab. 2).

Diese Einteilung ist nicht direkt auf alle Anwendungen übertragbar. So wurden für den Bereich des autonomen Fahrens eigene Skalen entwickelt, wie zum Beispiel die sechsstufige Skala von der SAE International (Society of Automotive Engineers International; SAE 2016).

Tab. 2: Autonomiestufen nach Thomas Sheridan (Parasuraman et al. 2000)

Stufe	Beschreibung
10	Computer fällt alle Entscheidungen, handelt autonom, ignoriert Menschen.
9	Computer informiert Menschen nur, wenn er selbst es so entscheidet.
8	Computer informiert Menschen nur, wenn er gefragt wird.
7	Computer führt automatisch aus, informiert Menschen wenn nötig.
6	Computer räumt Menschen für eine gewisse Zeit eine Widerspruchsmöglichkeit ein, bevor eine automatische Ausführung stattfindet.
5	Computer führt die vorgeschlagene Entscheidung/Aktion aus, wenn Mensch ihr zustimmt.
4	Computer schlägt eine Entscheidung/Aktion vor.
3	Computer bietet eine Auswahl von Entscheidungs-/Aktionsalternativen an.
2	Computer bietet alle Entscheidungs-/Aktionsalternativen an.
1	Computer bietet keine Assistenz: der Mensch fällt die Wahl für alle Entscheidungen und Aktionen.

Eine weniger differenzierte Unterscheidung von Autonomiestufen unbemannter Systeme, die sich eventuell leichter auf UMVs übertragen lässt, wurde von dem *National Institute of Standards and Technology* als Special Publication 1011 veröffentlicht (Huang 2004). Dort sind vier verschiedene Operationsmodi (Modes of Operation) definiert:

- Vollständige Autonomie (fully autonomous): Das unbemannte System führt eine vordefinierte Mission (innerhalb eines definierten Umfangs) ohne menschlichen Eingriff durch.
- Teilautonomie (semi-autonomous): Der Anwender und/oder das unbemannte System planen und führen die Aufgabe unter Verwendung unterschiedlicher Interaktionsebenen aus.
- Fernlenkung/Teleoperation (Teleoperation): Der Anwender nutzt Video und/oder Sensorinformationen, um entweder den Antrieb direkt zu steuern oder inkrementelle Ziele (Wegpunkte) kontinuierlich von außerhalb des Fahrzeugs via Kabel oder Funk zu übermitteln. In diesem Modus kann das unbemannte System nur eingeschränkt Eigeninitiative für die Erreichung der schrittweisen Ziele ergreifen.
- Fernsteuerung (remote control): Der Anwender steuert den Antrieb des unbemannten Systems ohne Video- oder Sensorinformationen kontinuierlich von außerhalb des Fahrzeugs via Kabel oder Funk unter Verwendung visueller Information. In diesem Modus ergreift das unbemannte System keine Eigeninitiative und es verlässt sich auf den kontinuierlichen oder fast kontinuierlichen Input des Anwenders.

Die vorangegangene Auflistung der verschiedenen Unterscheidungen der Automatisierungs- bzw. Autonomiegrade soll den Bedarf einer klareren Definition in Bezug auf UMVs unterstreichen. Vielversprechend ist hierbei die Entwicklung im Zuge der Forschung im Bereich der autonomen Handelsschiffe oder Standardisierungsbestrebungen, wie von der *American Society for Testing and Materials (ASTM) Committee F41* für UMVs. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass solche detaillierteren Skalen, wie die von Sheridan, eventuell nicht direkt auf ein komplettes UMV übertragen werden können, jedoch auf Teilaufgaben oder einzelnen Funktionen (AAWA 2016).

3 Sensorik

Grundsätzlich können all jene hydrographischen Messgeräte auf unbemannte Messplattform eingesetzt werden, die auch auf Vermessungsschiffen genutzt werden. Dies gilt auch für Systeme, die unter Wasser Verwendung finden, da viele Hersteller Versionen ihrer Geräte anbieten, die für den Einsatz in größeren

Wassertiefen bei höherem Druck ausgelegt sind. Die Art der installierten Sensoren ist abhängig von der jeweiligen Anwendung, der Größe der Plattform, dem Antrieb, dem Einsatzgebiet und, bei Systemen die nicht durch ein Kabel mit einer externen Stromquelle verbunden sind, der Batteriekapazität bzw. der Einsatzzeit. Die auf einem UMV installierten Sensoren haben unterschiedliche Funktionen: Hydrographische Datenerfassung, Navigation und Objektdetektion zur Kollisionsvermeidung.

Typisch eingesetzte hydrographische Messgeräte sind das Fächerecholot, Seitensichtsonar (Side Scan Sonar), Synthetic Aperture Sonar, Einstrahlecholot, Sedimentecholot (Sub-bottom profiler), Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), Kameras und Laserscanner. Sie dienen der Umgebungserfassung und Kartierung. Des Weiteren werden oft auch ozeanographische oder chemische Sensoren, wie zum Beispiel Licht- oder Sauerstoffsensoren, Fluorometer, Turbulenzsonden oder Trübungssensoren in ein System integriert. Die Messgeräte und Sensoren können auf großen Plattformen simultan eingesetzt werden. Alternativ kann bei modularen Systemen nach dem Baukastenprinzip entsprechend des jeweiligen Einsatzes die benötigte Systemkonfiguration individuell zusammengestellt werden.

Neben den eigentlichen hydrographischen Kartierungsgeräten bzw. -sensoren spielen die für die Navigation der Messplattform und Georeferenzierung der erhobenen Messdaten eingesetzten Sensoren eine wichtige Rolle. Bei USVs kann, wie auf bemannten Vermessungsschiffen auch, GNSS (Global Navigation Satellite System) für die Positionierung eingesetzt werden. Unter Wasser ist dies nicht möglich und somit werden oft akustische Unterwasserpositionierungssysteme wie LBL (Long Baseline), SBL (Short Baseline) oder USBL (Ultra Short Baseline) eingesetzt (Abb. 3). Die Systeme bestehen jeweils aus den beiden Komponenten Transponder (abgeleitet von Transmitter und Responder) und Transducer (Wandler), die sowohl an dem zu positionierendem Fahrzeug und einem Begleitschiff oder dem Gewässerboden (auf bekannter Position) befestigt werden. Durch Strecken- und Richtungsmessungen kann eine relative Positionierung erfolgen. Der globale Bezug kann durch das schiffsbasierte GNSS (BSL, USBL) bzw. die bekannten Positionen der Transponder (LBL) hergestellt werden. Gegenüber LBL haben SBL und USBL den Vorteil, dass keine festen Installationen benötigt werden. Sie sind dadurch flexibler einsetzbar. Der Verzicht auf ein Begleitschiff ist jedoch bei LBL von Vorteil (Paull et al. 2014). GNSS und akustische Unterwasserpositionierung sind Methoden, bei denen die Positionierung über Messungen zu Festpunkten erfolgt.

Neben der Positionierung ist die Bestimmung der Orientierung der Sensorplattform für die Qualität der Kartierung von essenzieller Bedeutung. Ein inertiales Navigationssystem (INS) bestimmt nicht nur die Ausrichtung der Plattform, sondern ermittelt auch die Änderung der Position und Orientierung

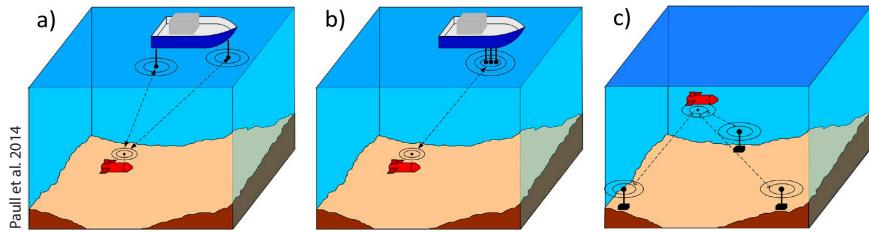


Abb. 3: Darstellung verschiedener akustischer Unterwasserpositionierungsmethoden:
a) LBL, b) SBL, c) USBL

durch Messung der Beschleunigung und der Winkelgeschwindigkeiten in Bezug auf die drei Systemachsen. Durch Integration ergeben sich die Translationen und Rotationen bezüglich der drei Systemachsen. Diese Informationen werden an einer zuvor bestimmten Position angebracht. Somit kann die aktuelle Position bestimmt werden. Diese Methode (Koppelnavigation, Dead-Reckoning) weist mit der Zeit eine steigende Unsicherheit (Drift) auf (Groves 2013). Nachteile einer Navigation über Festpunkte, wie GNSS oder akustische Unterwasserpositionierung, sind die Möglichkeit der Abschattung oder auch eine geringe Messrate. Um die Nachteile der jeweiligen Techniken (Koppelnavigation und Navigation über Festpunkte) auszugleichen und die Genauigkeit der finalen Navigationslösung zu verbessern, werden integrierte Navigationslösungen verwendet. Dabei werden die Navigationslösungen bzw. die Messwerte einzelner Methoden durch Techniken der Bewegungsfilterung (meist Kalman-Filter) fusioniert. Ein typisches Beispiel ist die Kombination von Koppelnavigation und GNSS/akustischer Unterwasserpositionierung (Groves 2013).

Befindet sich ein AUV in einem Gebiet in dem zuvor keine Infrastruktur angebracht wurde bzw. kein Schiff begleitend eingesetzt werden kann, besteht die Möglichkeit, dass das AUV in regelmäßigen Abständen an die Wasseroberfläche für einen GNSS-Fix auftaucht. Es können auch andere Sensoren, wie ein Dopplerlog (Doppler Velocity Log – DVL), Drucksensor bzw. CTD-Sonden (Conductivity Temperature Depth) oder Altimeter, zur Stützung der Koppelnavigation eingesetzt werden.

Ein weiterer Navigationsansatz zur Stützung der Koppelnavigation beinhaltet die Übermittlung von Umgebungsinformationen im Vorfeld eines Einsatzes in Form von beispielsweise Geländemodellen oder Magnetikdaten. Die akustischen, optischen oder magnetischen Sensordaten können dann in Echtzeit mit der a priori Information verglichen und zur Positionierung herangezogen werden (terrain based navigation) (Paull et al. 2014). Sind keinerlei Informationen über das Gebiet im Vorwege bekannt, so kann mit Hilfe der SLAM-Methode (simultaneous localization and mapping) die Positionierung erfolgen. Bei diesem Ansatz werden während des Einsatzes die Sensordaten verwendet, um eine

Umgebungskarte zu erstellen und diese gleichzeitig zur Positionierung zu nutzen (Ribas et al. 2010).

Bei unbemannten und vor allem autonom betriebenen Multisensorsystemen werden weitere Sensoren für die Kollisionsvermeidung (collision avoidance) eingesetzt. Für die Detektion von potenziellen Hindernissen auf dem Wasser können Kameras, Radar, AIS (Automatic Information System) und Laserscanner eingesetzt werden. Für die Erkennung von Unterwasserhindernissen werden vorausschauende Sonare (imaging sonar, profiling sonars) verwendet. Durch die Kombination mehrerer dieser Sensoren lassen sich eventuelle Schwächen einzelner Sensoren in bestimmten Bereichen kompensieren und die Zuverlässigkeit der Objektdetektion erhöhen.

4 Anwendungsbereiche

Unbemannte Multisensorsysteme werden in vielen Bereichen der Hydrographie eingesetzt. Die Größe der eingesetzten Systeme, die Anzahl und Art der installierten Sensoren sowie der Grad der Autonomie variieren in Abhängigkeit der Anforderungen der einzelnen Anwendung und des Einsatzgebietes. Unterteilt nach UMV-Kategorien werden nachfolgend typische Anwendungen der Themenbereiche Forschung, kommerzielle Anwendungen und Militär exemplarisch aufgeführt.

4.1 ROV – Remotely Operated Vehicles

Observation Class ROVs sind in der Regel mit Kameras ausgestattet und werden für visuelle Inspektionen jeglicher Art eingesetzt. Ein Mini-OCROV ist in Abb. 4a dargestellt. Die visuellen Informationen können zum Beispiel für archäologische Untersuchungen, Wracksuche, zur Erfassung von Flora und Fauna, zur Überprüfung von Fischkäfigen und Netzen, „Search and Recovery“-Einsätzen oder der Inspektion von Off-, Near-, oder Inshore-Anlagen oder Schiffshüllen verwendet werden. In Gebieten mit geringen Sichtweiten können darüber hinaus „Multibeam Imaging Sonare“ für die akustische Umgebungsvizualisierung eingesetzt werden.

Größere ROVs (meist MSROV (Abb. 4b) oder auch WCROV) können zusätzlich mit Greifarmen ausgestattet werden und erlauben somit Probeentnahmen am Meeresboden oder Arbeiten an Offshore-Anlagen im Bereich IMR (inspection, maintainance, repair; Ribas 2010). WCROVs (Abb. 4c) werden neben der Tiefseeforschung (für Beprobungen oder Kartierungen) in der Öl- und Gasindustrie für die Einrichtung und Montage von Offshore-Anlagen, der Positionierung und Verlegung von Kabeln bzw. Pipelines eingesetzt (Christ und Wernli 2014).



Abb. 4: Beispiele für ROVs verschiedener Größen: a) Mini-OCROV VideoRay (videoray.com), b) MSROV Super Mohawk II von Sub-Atlantic (f-e-t.com), c) WCROV Millennium Plus (oceaneering.com)

Im militärischen Bereich finden ROVs Anwendung bei der Seeminenabwehr (MCM – mine counter measure), bei „Search and Recovery“-Operationen sowie Inspektion und Sicherheitsaufgaben (Christ und Wernli 2014).

4.2 AUV – Autonomous Underwater Vehicles

Eines der ersten im Bereich der Tiefseeforschung eingesetzten AUV war das IFREMER L'Epauleard, welches im Jahre 1983 Schwarz-Weiß-Bilder von einem Manganknollenfeld in 6100 m Wassertiefe sammelte (Galerne 1983). Heutzutage werden AUVs in der Forschung im Bereich der Geowissenschaften weiterhin hauptsächlich für die Kartierung von Tiefseeregionen oder unter Meereis eingesetzt. Ihre Daten werden für Untersuchungen von geomorphologischen Strukturen, submarinem Vulkanismus, Hydrothermalfeldern oder zum „Benthic Habitat Mapping“ verwendet (Wynn et al. 2014). Unterwassergleiter eignen sich durch ihre Vertikalbewegungen nicht unbedingt für Kartierungen. Sie zeichnen sich durch ihre langen Einsatzzeiten aus und werden daher zum Beispiel für langzeitige ozeanographische Messungen verwendet, wie bei der ersten Atlantikquerung des ferngesteuerten Unterwassergleiters Sculum von Teledyne Webb Research im Jahre 2009 (Shapiro 2010).

Im kommerziellen Sektor werden AUVs bei der Exploration von Tiefseerohstoffen oder bei Kabel- oder Pipelinevermessungen genutzt. Einer der ersten

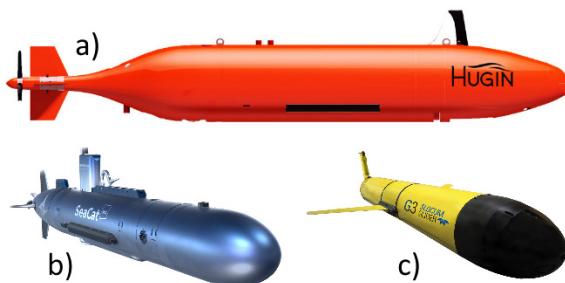


Abb. 5:
Beispiele für AUVs:
a) AUV Hugin (kongsberg.com),
b) AUV SeaCat (atlas-elektronik.com),
c) Sculum G3 Glider (teledynemarine.com)

sehr erfolgreichen Einsätze eines AUVs erfolgte 1996 mit dem Theseus AUV von ISE bei der Verlegung von mehreren 200 km Kabeln in ca. 400 m Wassertiefe unter einer Eisdecke (Thorleifson et al. 1997). Heute können AUVs Pipelines selbstständig detektieren und deren Verlauf folgen. Sie bieten große Vorteile bei militärischen Einsätzen, wie zum Beispiel bei der Seeminenabwehr, bei schneller Umweltanalyse und -bewertung (REA – Rapid Environmental Assessment), bei Aufklärung und Überwachung oder bei verdeckten Operationen. In Abb. 5 sind verschiedene Typen von AUVs dargestellt.

4.3 USV – Unmanned Surface Vehicles

Die ersten wissenschaftlichen Prototypen von autonomen USVs wurden vor ca. 20 Jahren entwickelt. Hierzu zählen zum Beispiel MESSIN der Universität Rostock (Majohr et al. 2000) und ARTEMIS des *MIT Sea Grant College Program's Autonomous Underwater Vehicle Laboratory* (Vaneck et al. 1996). ASVs bieten eine kostengünstige Alternative zum Schiffseinsatz und erhöhen die Effizienz bei der Datenakquisition, wie beispielsweise beim Einsatz des M80B von Oceanalpha zur Fächerecholotvermessung in antarktischen Gewässern (Oceanalpha 2018).

Ein wichtiger Vorteil von USVs ist ihr möglicher Einsatz in sehr flachen Gebieten, in denen kein Schiffseinsatz realisierbar ist. ASVs, die Solar- und/oder Wellenenergie nutzen, weisen lange Missionsdauern auf. Solche ASVs werden vor allem für langzeitausgelegte ozeanographische Datenaufzeichnungen verwendet. In entlegeneren Gebieten können die Daten über Satelliten an Landstationen übermittelt und anschließend allgemein zugänglich gemacht werden. Der GEOMAR Navigator des *GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung* kann hierfür beispielhaft genannt werden (<https://waveglider.geomar.de/navigator>). Als erstes ASV überquerte der Wave Glider von Liquid Robotics im Jahre 2012 den Pazifik (Liquid Robotics 2018). Aufgrund ihrer geringen Geräuschemission eignen sich solche ASVs auch für passives akustisches Monitoring von Meeressäugern.

Die allerersten ferngesteuerten USVs wurden bereits im Zweiten Weltkrieg vom Militär eingesetzt. Kleinere USVs werden gegenwärtig zum Beispiel im Be-



Abb. 6: Beispiele für USVs: a) SONOBOT (evologics.de), b) DriX (ixblue.com), c) Mariner (maritimerobotics.com)

reich der Seeminenabwehr im Verbund von mehreren Fahrzeugen in Begleitung eines Mutterschiffs eingesetzt. Auch werden größere semi-autonome USVs, mit Waffen ausgestattet, für maritime Sicherheit und Verteidigung genutzt (Campbell et al. 2012). In Abb. 6 sind verschiedene Beispiele für USVs dargestellt.

5 Vor- und Nachteile des Einsatzes unbemannter Multisensorsysteme

Ein großer Vorteil von unbemannten Multisensorsystemen ist, dass sie in Gebieten eingesetzt werden können, wo der Einsatz von Menschen zu gefährlich wäre (z.B. Minensuche) oder die nicht in dieser Form zu erreichen sind (z.B. Flachwasser, Tiefsee, unter Eis). Durch ihren Einsatz können auch Schiffszeit und die damit verbundenen Kosten eingespart bzw. die Effizienz erhöht werden.

Ein weiterer Vorteil des Einsatzes von UUVs liegt in der Nähe der Plattform zum Gewässerboden bzw. dem zu untersuchenden Objekt. Die Aufnahme von hydroakustischen oder visuellen Daten ist wegen der geringeren Reichweite in einer besseren räumlichen Auflösung oder überhaupt erst möglich. Darüber hinaus sind Probenahmen oder Eingriffe in Wassertiefen realisierbar, die für einen Taucher nicht erreichbar wären. Unzugängliche Gebiete lassen sich somit explorieren und hochauflösend vermessen. Ein Einsatz unter Wasser bietet eine Umgebung mit verminderter Geräuschkulisse und geringerem Welleneinfluss, wodurch die Plattform stabiler im Wasser liegt.

Da für die Positionierung von UUVs kein GNSS verwendet werden kann, ist die Erreichung einer hohen Positionierungsgenauigkeit schwieriger und abhängig von den eingesetzten Navigationsverfahren sowie den örtlichen Gegebenheiten. Mit AUVs ist zusätzlich nur eine limitierte Kommunikation während des Einsatzes möglich. Akustische Unterwasserkommunikationsmethoden verfügen nur über eine geringe Bandbreite und optische Methoden sind durch ihre Reichweite eingeschränkt (Manley 2016). Eine Echtzeitqualitätskontrolle der Kartierungsdaten durch den Anwender ist somit nicht möglich, da die Daten nicht übertragen werden können. Erst nach einem Einsatz können die Daten ausgelesen und analysiert werden. Sollten Minimalanforderungen bezüglich der Messpunktdichte oder Überlappung der Daten nicht erreicht worden sein, muss eine Nachmessung erfolgen. Eine nicht vorhandene automatische Routenanpassung, basierend auf der Datenqualität der Kartierung, kann somit zeitintensive Folgen haben. Hinzu kommt, dass auch das Aussetzen und Wiedereinbringen der unbemannten Systeme vom Schiff aus aufwendig sein kann und somit zusätzlich weitere Zeit in Anspruch nimmt.

Bei ferngesteuerten Messplattformen, ob unter oder auf dem Wasser, ist die Entfernung zum Operator und somit die Ausdehnung des Einsatzgebietes limi-

tiert. Bei Fahrzeugen ohne externe Stromquelle spielt die Batteriekapazität eine entscheidende Rolle für die Einsatzdauer. Ein weiterer Aspekt ist die Implementierung zuverlässiger Kollisionsvermeidungsalgorithmen bei autonomen Fahrzeugen. Dies betrifft vor allem ASVs, die in Küstennähe bzw. in stark befahrenen Gewässern eingesetzt werden, da dort die Kollisionsgefahr mit Schiffen oder Hobbysportlern besonders hoch ist.

Neben den aufgeführten technischen Aspekten spielen auch die rechtlichen Aspekte eine erhebliche Rolle beim Einsatz unbemannter Systeme. In vielbefahrenen Gebieten und Häfen gibt es bisher keine Regularien für den Einsatz von UMVs. In der Regel wird eine Anfrage an den Hafenmeister gestellt, um einen Einsatz zu genehmigen. 1972 wurde von der International Maritime Organization (IMO) die „Convention on the International Regulation for Preventing Collisions at Sea (COLREGs)“ und damit Kollisionsvermeidungsregeln im Seeverkehr herausgegeben. Sie beschreiben verschiedenste mögliche Kollisionsszenarien und entsprechende Ausweichmanöver. Nach Campbell et al. (2012) besteht noch hoher Bedarf bei der Integration der COLREGs in die Ausweichalgorithmen, insbesondere bei USVs. Dafür ist ebenfalls nicht nur die Detektion, sondern auch eine sichere Klassifizierung eines Objektes (statisch/beweglich oder Land/Schiff) sowie die Erfassung seiner eventuellen Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit für die richtige Aktionsauswahl entscheidend.

6 Beispiele für aktuelle Trends und Entwicklungen

Aus den im Kap. 5 aufgeführten Limitationen von UMVs gehen Forschungs- und Entwicklungsbedarfe hervor. Dies betrifft unter anderem die Weiterentwicklung der eingesetzten Komponenten. Durch die Fortschritte in diesen Bereichen ergeben sich verbesserte und neue Möglichkeiten für den Einsatz von UMVs. Einige Trends sollen im Folgenden aufgeführt werden.

Vernetzung/Schwärme: Durch die Weiterentwicklung der Unterwasserkommunikation ist die Vernetzung mehrerer UMVs und folglich ihr kombinierter Einsatz möglich. Dadurch können Sensorabdeckung und somit Effizienz erhöht werden. Auch lassen sich verschiedene Arten von UMVs, zum Beispiel UUVs und USVs, kombiniert einsetzen, um jeweilige Vor- und Nachteile einzelner Systemtypen zu kompensieren. USVs können als Kommunikationslink oder Positionierungshilfe fungieren. Im Projekt *High Seas Telemetered Seismographic Observatory* vom *Scripps Institution of Oceanography* werden zum Beispiel Messdaten von am Meeresboden installierten Seismometern an ein *Ocean Surface Gateway* (bestehend aus einem USV, das ein akustisches Modem schleppt) weitergegeben, das wiederum die Daten über Satellit an Landstationen in annähernd Echtzeit



Abb. 7: a) Schematische Darstellung des Prototypens *High Seas Telemetered Seismographic Observatory* des Scripps Institution of Oceanography (Berger et al. 2016), b) Komponenten des subCULTron Umwelt-Monitoring-Systems (subCULTron 2018), c) SwarmDiver (Aqua-botix 2018)

sendet (Berger et al. 2016). Eine schematische Darstellung des Aufbaus ist in Abb. 7a dargestellt. USVs können auch als UUV-Träger verwendet werden, was bereits vor zehn Jahren erfolgreich demonstriert wurde (Bertram 2008). Ebenso ist die Vernetzung von UMVs mit luftgestützten Systemen (UAVs) möglich.

An der Realisierung von autonomen UMVs, die in einem Verbund als kooperatives System agieren, wird zum Beispiel im Rahmen des EU-Projektes *subCULTron* gearbeitet, welches das Umwelt-Monitoring in Venedig zum Ziel hat (subCULTron 2018; Abb. 7b). Ein solcher Verbund wird als Schwarm bezeichnet. Die UMVs eines Schwarmes haben ein gemeinschaftliches Ziel, kommunizieren untereinander und stimmen zum Beispiel ihre Routen aufeinander ab. Ziele einzelner UMVs werden delegiert (Tena 2016). Erste als Schwärme bezeichnete Systeme sind bereits kommerziell erhältlich, wie der *SwarmDiver* von *Aquabotix* (Aquabotix 2018; Abb. 7c). Eine weitere Steigerung des autonomen Einsatzes von UMVs ist die Anwendung von künstlicher Intelligenz (KI), so dass UMVs auch durch Erfahrungen lernen können und sich somit selbstständig weiterentwickeln. KI ist ein breiter Forschungsbereich, der verschiedensten Mensch-Maschine-Felder tangiert. Eine vollständige Anwendung von KI für UMVs ist in naher Zukunft jedoch noch nicht zu erwarten.

Low-Cost/Open-Source: Im Zuge der Weiterentwicklung der Sensorik, werden auch immer mehr kleinere „Low-Cost“ UMVs kommerziell angeboten. Der Micro-UUV von *Riptide Autonomous Solution* ist zum Beispiel schon ab einer Länge von ca. 64 cm und einem Durchmesser von 12,5 cm zu haben (Abb. 8a). Für den Hobby-Bereich werde UMVs wie der *PowerRay* von *Power Vision* für einen Preis von unter 2000 US-Dollar angeboten, der neben Unterwasseraufnahmen zusätzlich zur Fischdetektion eingesetzt und über eine VR-Brille gesteuert werden kann (Abb. 8b). Der *BIKI* von *Robosea* für 1000 US-Dollar wird über Wasser über ein Smartphone und unter Wasser über eine Fernbedienung gesteuert. Er kann auch einer vordefinierte Routen folgen und ist somit einer der

ersten teilautonome UMVs auf dem Hobby-Segment (Abb. 8c). Offene Schnittstellen an UMVs und freizugängliche Programmier-Codes (wie MOOS-IvP: Mission Oriented Operating Suite – Interval Programming) ermöglichen die Einflussnahme und Anpassung durch den Anwender.



Abb. 8:
Beispiele für Low-Cost UMVs:
a) Micro-UUV (riptideas.com),
b) PowerRay (powervision.me),
c) BIKI (robosea.org)

Spezialanwendungen/Hybride Systeme: Im Gegensatz dazu ist auch ein Trend hin zu größeren UMVs erkennbar. Sie ermöglichen längere Missionen und einen größeren Payload. Durch Weiterentwicklung von Sensoren lassen sich UMVs für spezialisierte Anwendungen einsetzen und somit neue Anwendungsfelder erschließen. Im Rahmen des Projektes IMGAM (Intelligentes Monitoring Gasaustritten im Meer) wurde ein AUV entwickelt (Abb. 9a), das autonom Gasaustritte detektiert und für spätere Analysen beprobt (Abildgaard 2017). Ein weiteres Beispiel für eine sehr spezialisierte Anwendung ist der *Sea Dragon* (Abb. 9b), der für Eisbergvermessung unter und über Wasser eingesetzt wird (Peters 2015). Ebenfalls finden verstärkt hybride Systeme wie der *Seaeye*



Abb. 9:
a) IMGAM AUV (Abildgaard 2017),
b) Sea Dragon (Peters 2015),
c) ROV/AUV SAAB Seaeye Sabertooth (SAAB 2018)

Sabertooth von SAAB Einzug (Abb. 9c). Dieser verhält sich in seiner Bewegung und seinen Aufgaben, wie Installationen oder Reparaturen, wie ein ROV, kann aber teilweise autonom eingesetzt werden (SAAB 2018). Eine Kombination aus UAV und UUV wurde unter anderem von der Rutgers Universität mit dem *Navigator* entwickelt, der sowohl in der Luft aber auch unter Wasser eingesetzt werden kann (Blesch 2015).

Verlängerung der Einsatzdauer: Durch stetige Fortschritte im Bereich der Akku-Technologie werden längere Einsatzzeiten von UMVs ermöglicht. Die *Aluminium Seawater Battery* von *L3 Open Water Power* verspricht eine Steigerung der Einsatzdauer um das bis zu zehnfache im Vergleich zu herkömmlich eingesetzten Lithium-Ionen-Batterien (L3 Open Water Power 2018). Die Verwendung innovative Energiegewinnungsmethoden, wie bereits bei langzeitlich eingesetzten USVs, verspricht ebenfalls eine Steigerung der Einsatzzeiten. Die Weiterentwicklung von Docking-Stationen zielt auf einen stationären Betrieb von UMVs im Untersuchungsgebiet hin. Durch Docking-Stationen kann zum einen das Ablassen und Einholen von UUVs erleichtert werden (Manley 2016), zum anderen ermöglichen sie wechselseitigen Datenaustausch zwischen Anwender und Plattform (Hurtos et al. 2017) sowie das Aufladen der Batterien aus der Entfernung (Boeck et al. 2014).

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Weiterentwicklung von UMVs profitierte in der Vergangenheit und auch aktuell von rasanten Fortschritten in den Technologien der Teilkomponenten wie Antrieb, Batteriekapazität, inertialer und akustischer Positionierung, Unterwasserkommunikation und Computertechnik (Manley 2016). Diese Fortschritte ermöglichen die Entwicklung einer großen Vielfältigkeit von unbemannten Multisensorplattformen, die in den verschiedensten Feldern der Hydrographie heutzutage zum Einsatz kommen. Dieses zeigt auch die zunehmende Anzahl an Anbietern solcher Systeme. Verschiedene Marktvorhersagen wie von MarketsandMarkets oder Douglas-Westwood sehen für die kommenden Jahre eine weitere Wachstumssteigerung im Verkauf von UMVs vorher.

Trotz ihres vermehrten Einsatzes und der kontinuierlichen und rasanten Weiterentwicklung gibt es noch Entwicklungsbedarfe. Unterstützt und vorangetrieben werden Forschungen in UMV-Bereich auch durch unterschiedlichste Wettbewerbe wie *AUVSI Robosub* oder *Shell Ocean Discovery XPRIZE*. Vor allem Entwicklungen im Bereich der Autonomie hin zu kooperativen und adaptiven autonomen Systemen sind vielversprechend. Solche Systeme würden weitere Möglichkeiten ihres Einsatzes eröffnen. Parallel dazu muss der rechtliche Rah-

men für den Einsatz autonomer UMVs seitens des Gesetzgebers klar definiert werden. Überlegungen dazu sind bereits vorhanden und der Trend hin zu autonomeren Handelsschiffen verspricht eine verstärkte Intensivierung dieses Themas.

Bereits heute ermöglichen UMVs Einsatzes, die vor 20 Jahren noch nicht denkbar schienen. Sie erlauben Missionen, die anderweitig nicht realisierbar wären. Dennoch sind UMVs heute noch nicht die Lösung für alle hydrographischen Aufgaben und können bisher nicht den Einsatz von Vermessungsschiffen ersetzen. Ihre Zukunft ist jedoch vielversprechend und mit Spannung zu erwarten.

Literatur

- AAWA (2016): Remote and Autonomous Ships – The next steps. www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/marine/ship-intel/aawa-white-paper-210616.pdf, letzter Zugriff 03/2018.
- Abildgaard, M. (2017): Simulation based design and development of autonomous underwater vehicle IMGAM. In: Hydrographische Nachrichten 106, 2/2017, 20–24.
- Aquabotix (2018): www.aquabotix.com/micro-usvs.html, letzter Zugriff 04/2018.
- Berger, J. G.; Laske, J.; Babcock, J.; Orcutt, J. (2016): An ocean bottom seismic observatory with near real-time telemetry. In: Earth and Space Science, 3, 68–77. DOI: [10.1002/2015EA000137](https://doi.org/10.1002/2015EA000137).
- Bertram, V. (2008): Unmanned Surface Vehicles – A Survey. In: Proceedings of Skibsteknisk Selskab, Copenhagen, Denmark. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.462.1894&rep=rep1&type=pdf>, letzter Zugriff 04/2018.
- Blesch, C. (2015): Navy Funds Rutgers to Develop Drone Equally Adept at Flying and Swimming. Rutgers Today. <https://news.rutgers.edu/research-news/navy-funds-rutgers-develop-drone-equally-adept-flying-and-swimming/20151022>, letzter Zugriff 04/2018.
- Boeck, F.; Golz, M.; Ritz, S.; Holbach, G. (2014): SMIS – Subsea Monitoring via Intelligent Swarms, Design Challenges of an Autonomous Seabed Station. ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Volume 8B: Ocean Engineering, San Francisco, California, USA. DOI: [10.1115/OMAE2014-24058](https://doi.org/10.1115/OMAE2014-24058).
- BPB – Bundeszentrale für politische Bildung (2018): Automatisierte und autonome Systeme in der Militär und Waffentechnik. www.bpb.de/apuz/232968/automatisierte-und-autonome-systeme?p=all#footnote2-2, letzter Zugriff 04/2018.
- Brüggemann, T.; Artz, T.; Weiß, R. (2018): Kalibrierung von Multisensorsystemen. In: DVW e. V. (Hrsg.): Hydrographie 2018 – Trend zu unbemannten Messsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 91, Wißner-Verlag, Augsburg. (Dieser Tagungsband).
- Campbell, S.; Naeem, W.; Irwin, G. W. (2012): A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres. In: Annual Reviews in Control, 36, 267–283. DOI: [10.1016/j.arcontrol.2012.09.008](https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2012.09.008).
- Christ, R. D.; Wernli Sr, R. L. (2014): The ROV Manual: A User Guide for Observation Class Remotely Operated Vehicles. 2nd Edition, Butterworth-Heinemann.
- Galerne, E. (1983): Epaulard ROV used in NOAA polymetallic sulfide research. Sea Technology 24, 40–42.

- Groves, P.D. (2013): Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. 2nd Edition, Artech House.
- Huang, H.-M. (2004): Terminology for Specifying the Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS). Vol. 1.0, National Institute of Standards & Technology, Special Publication 1011 (Terminology, Version 1.1). DOI: [10.6028/NIST.sp.1011](https://doi.org/10.6028/NIST.sp.1011).
- Hurtos, N.; Mallios, N.; Bosch, J.; Vallicrosa, G.; Vidal, E.; Ribas, D.; Gracias, N.; Carreras, M.; Ridao, P. (2017): LOON-DOCK: AUV homing and docking for high-bandwidth data transmission. In: OCEANS 2017 IEEE, Aberdeen, 2017. DOI: [10.1109/OCEANSE.2017.8084806](https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2017.8084806).
- L3 Open Water Power (2018): <http://openwaterpower.com>, letzter Zugriff 04/2018.
- Liquid Robotics (2018): www.liquid-robotics.com/press-releases/liquid-robotics-marine-robot-completes-9000-mile-cross-pacific-journey-to-set-new-world-record, letzter Zugriff 04/2018.
- Lurton, X. (2010): An Introduction to Underwater Acoustics. 2nd Edition, Springer, Berlin und Heidelberg.
- Majohr, J.; Buch, T.; Karte, C. (2000): Navigation and automatic control of the measuring dolphin (MESSIN). IFAC Maneuvering and Control of Marine Craft, Aalborg, Denmark, 399–404.
- Mandlburger, G.; Hauer, C.; Wieser, M.; Pfeifer, N. (2015): Topo-Bathymetric LiDAR for Monitoring River Morphodynamics and Instream Habitats – A Case Study at the Pießlach River. In: Remote Sensing, 7, 6160–6195. DOI: [10.3390/rs70506160](https://doi.org/10.3390/rs70506160).
- Manley, J. E. (2016): Unmanned Maritime Vehicles, 20 Years Of Commercial and Technical Evolution. In: OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, 2016. DOI: [10.1109/OCEANS.2016.7761377](https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761377).
- MIT (2016): MIT News. <http://news.mit.edu/2016/autonomous-fleet-amsterdam-roboat-0919>, letzter Zugriff 03/2018.
- Newman, P.; Westwood, R.; Westwood, J. (2007): Market Prospects for AUVs. Hydro International, Geomares. www.hydro-international.com/content/article/market-prospects-for-aups, letzter Zugriff 03/2018.
- Oceanalpha (2018): www.oceanalpha.com/show/antarctic-pole-come-unmanned-surface-vessel-oceanalpha-heading-south-pole.html, letzter Zugriff 04/2018.
- Parasuraman, R.; Sheridan, T. B.; Wickens, C. D. (2000): A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans. Volume 30, Issue 3, Mai 2000. DOI: [10.1109/3468.844354](https://doi.org/10.1109/3468.844354).
- Paull, L.; Saeedi, S.; Sato, M.; Li, H. (2014): AUV Navigation and Localization: A Review. In: IEEE Journal of Ocean Engineering, Volume 39, Issue 1, 131–149. DOI: [10.1109/JOE.2013.2278891](https://doi.org/10.1109/JOE.2013.2278891).
- Peters, G. (2015): Using autonomous vehicles to track ice in Iceberg Alley. Offshore Technology. www.offshore-technology.com/features/featureusing-autonomous-vehicles-to-track-ice-in-iceberg-alley-4593402, letzter Zugriff 04/2018.
- Ribas, D.; Ridao, D.; Neira, J. (2010): Underwater SLAM for Structured Environments Using an Imaging Sonar. Springer Tracts in Advanced Robotics, Vol. 65, Springer, Berlin und Heidelberg.

- Rolls-Royce (2018): Homepage. www.rolls-royce.com/media/press-releases/yr-2018/25-01-2018-rr-opens-autonomous-ship-research-and-development-centre-in-finland.aspx, letzter Zugriff 04/2018.
- Rudnick, D. L.; Davis, R. E.; Erikson, C. C.; Frantantoni, D. M.; Perry, M. J. (2004): Underwater Gliders for Ocean Research. *Marine Technology Society Journal*, Volume 38, Nr. 2, 73–84.
- SAAB (2018): www.seaeye.com/sabertooth.html, letzter Zugriff 04/2018.
- SAE (2016): J3016_201609: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems.
- Schwieger, V.; Sternberg, H. (2014): Multi-Sensor-Systeme in der Ingenieurgeodäsie – Grundlagen und Überblick. In: DVW e. V. (Hrsg.): *Multi-Sensor-Systeme – Bewegte Zukunftsfelder*. DVW-Schriftenreihe, Band 75, Wißner-Verlag, Augsburg, 3–23.
- Shapiro, A. R. (2010): Remotely Piloted Underwater Glider Crosses the Atlantic. *IEEE Spectrum*, 26. Februar 2010. <https://spectrum.ieee.org/robotics/industrial-robots/remotely-piloted-underwater-glider-crosses-the-atlantic>, letzter Zugriff 04/2018.
- subCULTron (2018): www.subcultron.eu, letzter Zugriff 04/2018.
- Tena, I. J. (2016): Autonomous Underwater Vehicles – A View to the Autonomous Vehicle Market 2016. In: *Hydro International*, Volume 20, Geomares Publishing.
- Thorleifson, J. M.; Davies T. C.; Black, M. R.; Hopkin, D. A.; Verrall, R. I.; Pope, A.; Monteith, I.; Den Hertog, V.; Butler, B. (1997): The Theseus autonomous underwater vehicle. A Canadian success story. In: *Proceedings of Oceans 1997*, MTS/IEEE, Halifax, Canada. DOI: [10.1109/OCEANS.1997.624127](https://doi.org/10.1109/OCEANS.1997.624127).
- Vaneck, T. W.; Rodriguez-Ortiz, C. D.; Schmidt, M. C.; Manley, J. E. (1996): Automated Bathymetry Using an Autonomous Surface Craft. In: *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, Volume 43, No. 4.
- Wynn, R. B.; Huvenne, V. A. I.; Le Bas, T. P.; Murton, B. J.; Connelly, D. P.; Bett, B. J.; Ruhl, H. A.; Morris, K. J.; Peakall, J.; Parsons, D. R.; Sumner, E. J.; Darby, S. E.; Dorrell, R. M.; Hunt, J. E. (2014): Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience. In: *Marine Geology* 352, 451–468.
- Wynn, R. B.; Huvenne, V. A. I.; Le Bas, T. P.; Murton, B. J.; Connelly, D. P.; Bett, B. J.; Ruhl, H. A.; Morris, K. J.; Peakall, J.; Parsons, D. R.; Sumner, E. J.; Darby, S. E.; Dorrell, R. M.; Hunt, J. E. (2014): Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience. In: *Marine Geology*, 352, 451–468.
- Yara International (2018): www.yara.com/knowledge-grows/game-changer-for-the-environment, letzter Zugriff 03/2018.

Kontakt

Tanja Dufek, M.Sc. | Prof. Dr.-Ing. Harald Sternberg
HafenCity Universität Hamburg
Überseeallee 16, 20457 Hamburg
tanja.dufek@hcu-hamburg.de | harald.sternberg@hcu-hamburg.de

Kalibrierung von Multisensorsystemen

Thomas Brüggemann | Thomas Artz | Robert Weiß

1 Einleitung

Zur Erfassung geometrischer Objekte werden häufig Messsysteme eingesetzt, die neben einem flächenhaft erfassenden Primärsensor mit weiteren Sensoren auf einem Sensorträger ausgerüstet sind. Als Basis derartiger integrierter Multisensorsysteme können verschiedenste Geräteträger, wie z. B. Schiffe, Flugzeuge, Hubschrauber, Autos oder unbemannte Trägersysteme (unmanned aerial/surface vehicles) verwendet werden. Die eigentlichen 3D-Messungen erfolgen mittels Laserscanner, Kameras oder Fächerlotsystemen während weitere Messsysteme häufig zur Georeferenzierung dieser relativen Messungen herangezogen werden. Dazu kommen häufig Global Navigation Satellite Systems (GNSS), inertiale Messeinheiten (inertial measurement units, IMU) und/oder Headingsysteme/Kompassen zum Einsatz. Teilweise werden diese Beobachtungen bereits direkt in Form inertialer Navigationssysteme (INS) zu einer einzelnen Ortungsinformation fusioniert.

Die einzelnen Komponenten eines Multisensorsystems führen zunächst unabhängige Beobachtungen in Bezug auf das jeweilige Sensorkoordinatensystem (S_s : Sensor Reference Frame) aus, welches in keiner festgelegten Relation zum Sensorträgerkoordinatensystem (S_b : Body Reference Frame) steht (Abb. 1). Daraus müssen die Orientierung und Lage der Systemkomponenten und somit die Einbauwinkel (Roll, Pitch und Yaw/Gier/Heading) und die Exzentrizitäten entsprechend bestimmt werden. Nur so kann das Genauigkeitspotenzial der heutigen Messsysteme vollständig genutzt werden. Auch wenn augenscheinlich keine Verdrehungen der verschiedenen Sensor Reference Frames gegeneinander vorliegen sollten, ist dies entsprechend nachzuweisen und zu dokumentieren. Die Auswirkungen einer nicht berücksichtigten Verdrehung sind sehr stark von der Größe der Exzentrizitäten der einzelnen Systemkomponenten zueinander abhängig.

Die Bestimmung der Einbauwinkel wird häufig auch als Kalibrierung bezeichnet und ist abhängig vom Geräteträger und den jeweiligen Einbauorten der Sensoren. Hierbei ist zwischen der relativen Ausrichtung der Sensoren zueinander und der absoluten Ausrichtung in Bezug auf das Sensorträgersystem S_b zu unterscheiden. Letzteres kann ausschließlich durch eine Vermessung (Einmessung) – typischerweise zum Zeitpunkt des Systemaufbaus – erfolgen, während durch Feldverfahren nur eine relative Kalibrierung bzw. eine Kalibrierung des Gesamt-

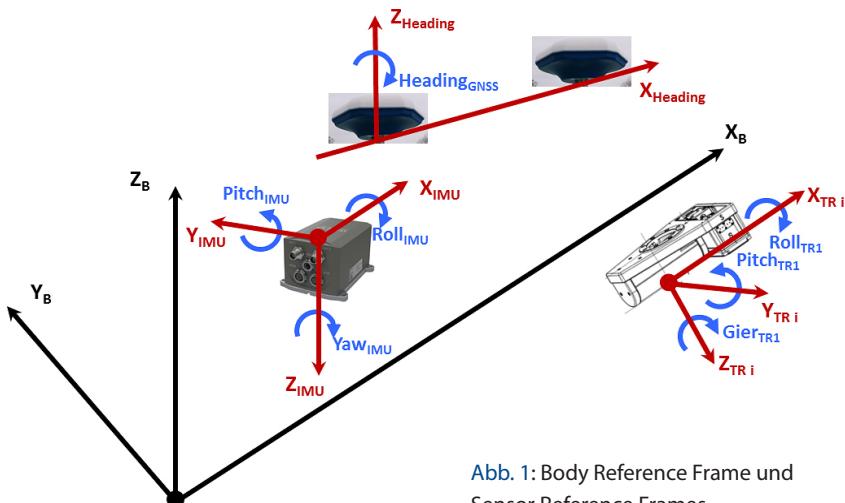


Abb. 1: Body Reference Frame und Sensor Reference Frames

systems erfolgen kann (Hughes Clarke 2003). Dabei stellt die Abhängigkeit der einzelnen Parameter eine wesentliche Schwierigkeit dar. In der Hydrographie wurden Verfahren entwickelt, die es erlauben durch gezielte Selektion der Messbereiche die Einflüsse der einzelnen Einbauwinkel im sogenannten „Patch-Test“ zu trennen (Wheaton 1988 und Godin 1998). Dieses Verfahren wird durch die Internationale Hydrographische Vereinigung empfohlen (IHO 2005) und wurde darüber hinaus für terrestrische Multisensorsysteme adaptiert (Keller und Sternberg 2013). Insbesondere im Bereich der luftgestützten Nutzung des Laser-scannings (Airborne Laserscanning, ALS) wurden Verfahren entwickelt, um die zu kalibrierenden Parameter aus den Messdaten abzuleiten (Filin 2003, Skaloud und Lichti 2006). Dabei werden im Allgemeinen geometrische a priori Informationen benötigt oder ebene Flächen vorausgesetzt. Diese Verfahren wurden von Seube, Levilly und de Jong (2016) zur Nutzung in der Hydrographie aufgegriffen. Im Gegensatz zur Feldkalibrierung ist die Einmessung auf der Werft (Brüggemann 2014) das ideale – wenn auch aufwendigere – Verfahren (Hughes Clarke 2003), da nur bei diesem Verfahren die absolute Orientierung ermittelt werden kann. Außerdem werden die einzelnen Sensoren unabhängig voneinander eingemessen, so dass Abhängigkeiten untereinander bzw. zum Messobjekt keine Rolle spielen.

Im Nachfolgenden wird die Bestimmung der Einbauwinkel durch Feldkalibrierverfahren (Patch-Test) und im Rahmen der Einmessung der Systemkomponenten anhand von hydrographischen Messsystemen auf Vermessungsschiffen näher erläutert. Die beschriebenen Verfahren sind jedoch grundsätzlich auch auf andere Multisensorsysteme und Geräteträger übertragbar.

2 Bestimmung der Einbauwinkel durch Feldkalibrierungen

Bei Feldkalibrierungen werden die „Einbauwinkel“ (Roll, Pitch und Heading) des „Gesamtsystems“ anhand von 3D-Geländepunkten einzelner, sich überlappender Messstreifen bestimmt. Hierbei kann somit nicht festgestellt werden, ob die bestimmten Winkel durch einen fehlerhaften Einbauwinkel beispielsweise des Fächerlotssystems oder durch die möglicherweise verdreht eingegebauten IMU verursacht wurden.

Voraussetzung einer Feldkalibrierung sind hierfür entsprechend geeignete Geländestrukturen, damit eine gegenseitige Beeinflussung der zu kalibrierenden Winkel ausgeschlossen bzw. minimiert wird. So wird für die Rollwinkelkalibrierung eine möglichst ebene Geländeoberfläche benötigt, da hierbei unkalibrierte Heading- und Pitchkomponenten keinen Einfluss auf das Messergebnis haben. Für die Pitch- und Headingkalibrierung werden hingegen stark strukturierte Geländeoberflächen oder markante Objekte benötigt. Die unterschiedlichen Anforderungen an die Geländeoberfläche erschweren die automatischen Verfahren, in denen alle Einbauwinkel gemeinsam in einem Auswerteprozess bestimmt werden.

Weiterhin ist die Reihenfolge der Einzelkalibrierungen zu beachten. Insbesondere sollte der Rollwinkel vor dem Headingwinkel und ein möglicher Zeitversatz zwischen den verschiedenen Systemkomponenten vor dem Pitchwinkel kalibriert werden. Auf die sogenannte Datenalterkalibrierung wird hier nicht näher eingegangen, da die Vorgehensweise mit der Pitchwinkelkalibrierung vergleichbar ist und sich im Wesentlichen nur durch die Messrichtung und Messgeschwindigkeit unterscheidet (IHO 2005).

Typischerweise müssen die Kalibrierungen iterativ ausgeführt werden. Außerdem muss anhand einer ausreichend hohen Anzahl von Berechnungsausschnitten kalibriert werden um ein zuverlässiges Ergebnis zu erhalten. Zudem sollten die Winkel nicht nur aus zwei Messstreifen abgeleitet werden, sondern aus mehreren Hin- und Rückmessungen um systematische Effekte zwischen den Einzelmessungen eliminieren zu können.

2.1 Rollwinkelkalibrierung

Ein unzureichend korrigierter Rollwinkel kann vorliegen, wenn die Koordinatentripel zweier übereinanderliegender Messstreifen, die in entgegengesetzter Messrichtung erfasst wurden, gegeneinander verdreht sind ([Abb. 2](#)).

Abhängig von der Anordnung der geländeerfassenden Sensoren (z. B. die jeweiligen Transducer eines Fächerlotssystems) und der sich daraus ergebenden unterschiedlichen Messbereiche ergibt sich die in [Abb. 3](#) dargestellte Messanordnung für die Rollwinkelkalibrierung. Bei diesem Beispiel handelt es sich um

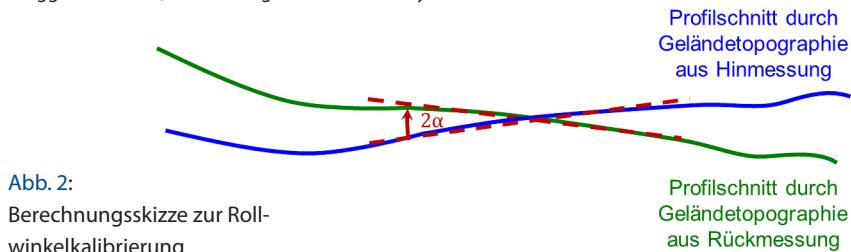


Abb. 2:
Berechnungsskizze zur Roll-
winkelkalibrierung

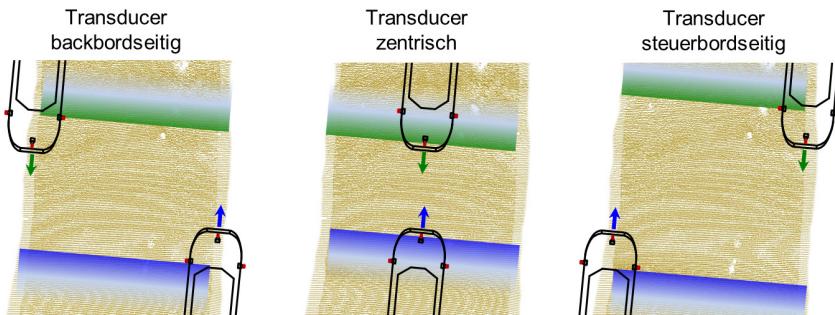


Abb. 3: Messanordnung zur Rollwinkelkalibrierung

ein Fächerlotssystem mit drei Transducern. Um eine möglichst große Geländeabdeckung zu erreichen, sind die äußeren Transducer entsprechend exzentrisch und relativ zur Schiffsquerachse geneigt installiert. Da die einzelnen Transducer getrennt voneinander zu kalibrieren sind, ergeben sich jeweils unterschiedliche Messanordnungen, wobei sich für den zu kalibrierenden Transducer eine bestmögliche Überdeckung ergibt.

Die zu erreichende Genauigkeit einer Rollwinkelkalibrierung soll anhand eines Beispiels erläutert werden. Hierbei wurden zwei Messstreifen eines Fächerlotssystems in Hin- und Rückmessungen mit einem und demselben Transducer überdeckend gemessen und daraus 21 Profile abgeleitet (Abb. 4).

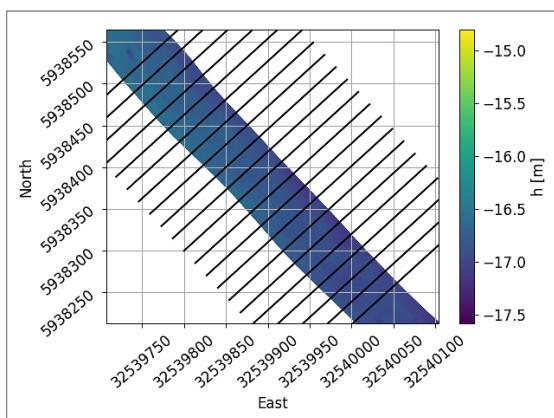


Abb. 4: Messdatendarstellung mit Profilschnitten

Durch die Daten der jeweiligen Profilschnitte eines jeden Messstreifen wurde eine ausgleichende Gerade berechnet und der Rollwinkel α sowie dessen Unsicherheit direkt aus der Ausgleichung bestimmt. Wichtig ist hierbei, dass die Fehlmessungen in den Messdaten insbesondere im Randbereich vorab entsprechend eliminiert werden. Das Ergebnis ist in Abb. 5 dargestellt. Es ist eindeutig, dass die Kalibrierergebnisse zwischen den einzelnen Profilschnitten teilweise

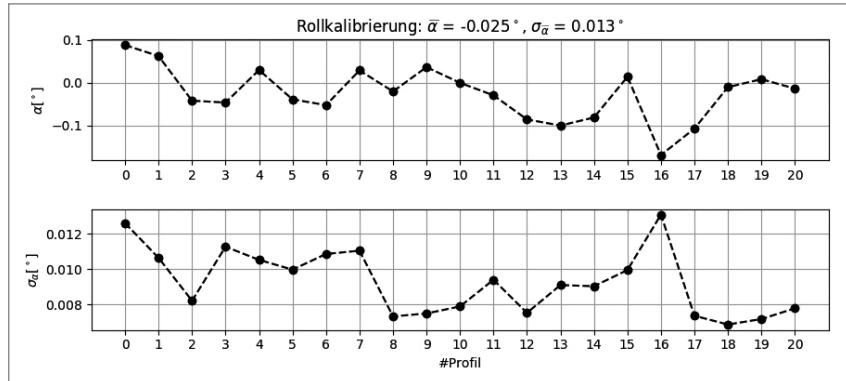


Abb. 5: Ergebnis der Rollwinkelkalibrierung

signifikant voneinander abweichen (Abb. 5 oben). Daher kann nur mit einer hohen Anzahl von Profilschnitten und Berechnung des Mittelwerts oder aber einer Ableitung des Rollwinkels aus den gesamten flächenhaften Messdaten ein bestmögliches Ergebnis erzielt werden. Die Präzision der Einzelkalibrierungen (Abb. 5 unten) ist zwar bedingt durch die hohe Messwertanzahl innerhalb der verwendeten Profile sehr hoch, jedoch können die Ergebnisse durch externe Einflüsse, wie beispielsweise Gewässerbodenstruktur, Einfluss von Wasserschallveränderungen oder Schiffssteuerung, stark beeinflusst sein. Die hier ermittelte empirische Standardunsicherheit des mittleren Rollwinkels aus 21 Profilen beträgt 0,013°.

2.2 Pitchwinkelkalibrierung

Ein unzureichend korrigierter Pitchwinkel kann vorliegen, wenn markante Objekte oder Strukturen der Geländeoberfläche in zwei übereinanderliegenden Messstreifen, die in entgegengesetzter Messrichtung erfasst wurden, im Nadirbereich in Längsrichtung gegeneinander verschoben sind (Abb. 6).

Auch hier ergibt sich abhängig von der Ausrichtung des jeweiligen Messbereichs der Transducer eines Fächerlotsystems die in Abb. 7 dargestellte Messanordnung für die Pitchwinkelkalibrierung. Für die Kalibrierung der einzelnen

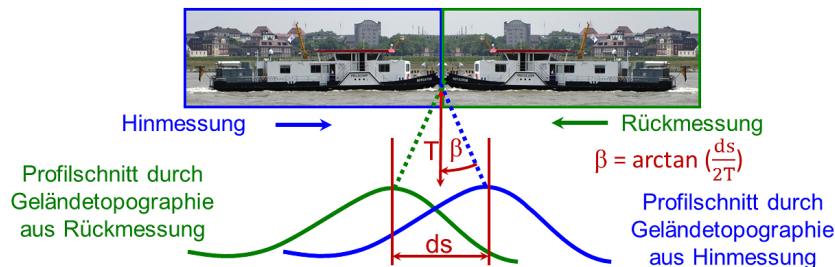


Abb. 6: Berechnungsskizze zur Pitchwinkelkalibrierung

Transducer sind die Hin- und Rückmessung jeweils so anzurichten, dass sich die Messbereiche des jeweils zu kalibrierenden Transducers bestmöglich überdecken.

Abhängig vom Abstand T zwischen Sensor und Geländeoberfläche, sowie dem Geländeversatz ds zwischen der Hin- und Rückmessung (Abb. 6), ergibt sich der Pitchwinkel β nach

$$\beta = \arctan\left(\frac{ds}{2T}\right). \quad (1)$$

Die Unsicherheit σ_β des so bestimmten Pitchwinkels ergibt sich nach

$$\sigma_\beta = \sqrt{\left(\left(\frac{2 \cdot T}{4 \cdot T^2 + ds^2}\right)^2 \cdot \sigma_{ds}^2 + \left(\frac{-2 \cdot ds}{4 \cdot T^2 + ds^2}\right)^2 \cdot \sigma_T^2\right)} \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (2)$$

Der entsprechende Geländeversatz kann beispielsweise durch manuelles Abgreifen des Punktabstandes aus einem Profilvergleich der Hin- und Rückmessung bestimmt werden. Auch bei der Pitchwinkelkalibrierung ist es wichtig,

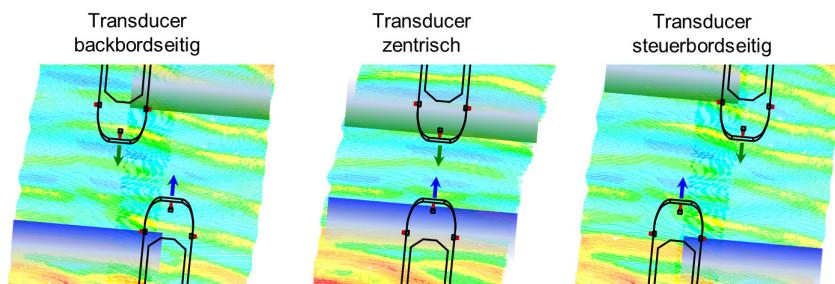


Abb. 7: Messanordnung zur Pitchwinkelkalibrierung

den Lageversatz an mehreren verschiedenen Stellen im Überlappungsbereich zu bestimmen. Gut geeignet sind hierfür Kalibriergebiete mit ausgeprägten Kolken bzw. Riffeln.

Die erreichbare Genauigkeit des Kalibrierverfahrens wurde für Fächerlotssysteme unterschieden nach Küsten- und Binnenbereich mittels Unsicherheitsfortpflanzung mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 68 % für ein Einzelobjekt berechnet (Tab. 1).

Bei einer Wassertiefe T von 15 m im Küstenbereich bzw. 4 m im Binnenbereich wird nach Wirth (2011) die Messunsicherheit σ_T im Zentralbereich mit 0,09 m bzw. 0,07 m abgeschätzt. Die Lageunsicherheit eines Punktes in Messrichtung wird mit σ_{Lage_along} im Zentralbereich mit 0,13 m bzw. 0,04 m abgeschätzt. Bei einem Pitchwinkel β von 1° ergäbe sich ein Lageversatz ds von 0,52 m bzw. 0,14 m. Mit

$$\sigma_{ds} = \sqrt{2} \cdot \sigma_{Lage_along} \quad (3)$$

ergibt sich die Unsicherheit des Lageversatzes σ_{ds} mit 0,18 m bzw. 0,06 m. Demnach kann der Pitchwinkel mit Hilfe einer einzelnen Pitchwinkelkalibrierung lediglich mit einer Standardunsicherheit σ_β von 0,35° im Küstenbereich bzw. 0,41° im Binnenbereich bestimmt werden. Die Genauigkeit der Pitchwinkelkalibrierung kann gesteigert werden, wenn der Umfang der Stichprobe zur Bestimmung des Geländeversatzes ds und damit dessen Standardunsicherheit σ_{ds} verringert wird. Dies kann z. B. durch die Berechnung über eine automatische Korrelation über eine längere Riffelstrecke erfolgen.

2.3 Headingwinkelkalibrierung

Eine unzureichend bestimmte Ausrichtung des Headingwinkels zeigt sich, wenn markante Objekte oder Strukturen der Geländeoberfläche in zwei übereinanderliegenden Messstreifen, die in entgegengesetzter Messrichtung erfasst wurden, im Randbereich in Längsrichtung gegeneinander verschoben dargestellt werden (Abb. 8).

Auch hier ergibt sich abhängig von der Ausrichtung des jeweiligen Messbereichs der Transducer eines Fächerlotssystems die in Abb. 9 dargestellte Mess-

Tab. 1: Unsicherheit des Pitchwinkels

	Küste	Binnen
T	15,00 m	4,00 m
σ_T	0,09 m	0,07 m
σ_{Lage_along}	0,13 m	0,04 m
ds	0,52 m	0,14 m
σ_{ds}	0,18 m	0,06 m
β	1,0°	1,0°
σ_β	0,35°	0,41°

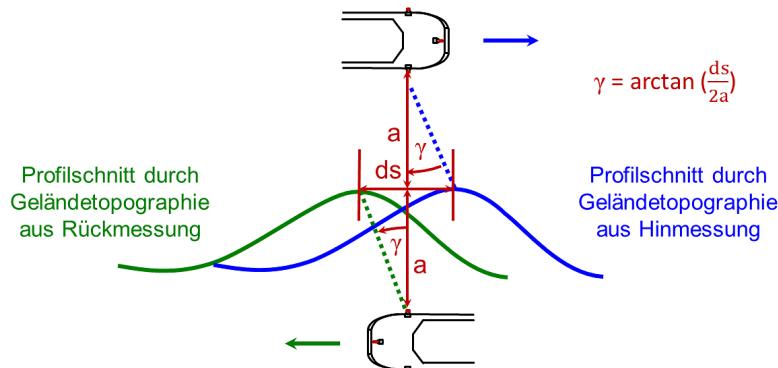


Abb. 8: Berechnungsskizze zur Headingwinkelkalibrierung

anordnung für die Kalibrierung des Headingwinkels. Die Hin- und Rückmessung sind für jeden Transducer so anzuordnen, dass sich die Ränder der Messbereiche des zu kalibrierenden Transducer bestmöglich überdecken.

Abhängig vom Abstand a und dem Geländeverzerrung ds (Abb. 8) ergibt sich der Headingwinkel γ nach

$$\gamma = \arctan\left(\frac{ds}{2a}\right). \quad (4)$$

Die Unsicherheit des Headingwinkels ergibt sich aus der Ableitung der o.g. Formel nach

$$\sigma_\gamma = \sqrt{\left(\left(\frac{2 \cdot a}{4 \cdot a^2 + ds^2}\right)^2 \cdot \sigma_{ds}^2 + \left(\frac{-2 \cdot ds}{4 \cdot a^2 + ds^2}\right)^2 \cdot \sigma_a^2\right)} \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (5)$$

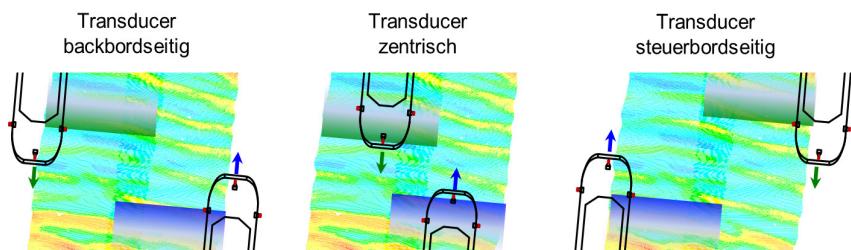


Abb. 9: Messanordnung zur Headingwinkelkalibrierung

Auch für den Headingwinkel wurde für ein Fächerlotssystem jeweils für ein typisches Messrevier im Küstenbereich und im Binnenbereich die zu erreichende Standardunsicherheit mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 68 % ermittelt (Tab. 2).

Bei einem Abstand a von 37 m im Küstenbereich bzw. 8 m im Binnenbereich, einer Unsicherheit σ_a von 1 m bzw. 0,5 m, sowie einer Lageunsicherheit eines Punktes in Messrichtung mit σ_{Lage_along} im Randbereich von 0,36 m bzw. 0,09 m ergäbe sich bei einem Einbauwinkel γ von 1° ein Lageversatz ds von 1,29 m bzw. 0,28 m. Mit Hilfe der Formel (3) ergibt sich die Standardunsicherheit des Lageversatzes σ_{ds} zu 0,51 m bzw. 0,12 m. Demnach kann der Headingwinkel mit einer Unsicherheit σ_γ von $0,39^\circ$ im Küstenbereich bzw. $0,43^\circ$ im Binnenbereich bestimmt werden. Wie bei der Pichwinkelkalibrierung kann eine Genauigkeitssteigerung durch optimierte Verfahren der Geländeversatzbestimmung erreicht werden.

Tab. 2: Unsicherheit des Headingwinkels

	Küste	Binnen
a	37,0 m	8,0 m
σ_a	1,0 m	0,5 m
σ_{Lage_along}	0,36 m	0,09 m
ds	1,29 m	0,28 m
σ_{ds}	0,51 m	0,12 m
γ	$1,0^\circ$	$1,0^\circ$
σ_γ	$0,39^\circ$	$0,43^\circ$

3 Bestimmung der Einbauwinkel durch eine Einmessung

Anhand von ausgewählten hydrographischen Messsystemen sollen Verfahren gezeigt werden, mit denen die Einbauwinkel getrennt für jeden Messsensor durch eine Einmessung bestimmt werden können. Die Positionen aller Sensoren müssen zunächst in einem fahrzeugfesten Koordinatensystem (S_B ; Body Reference Frame) qualitätsgesichert auf einer Helling an Land eingemessen werden (Abb. 10).

Zusätzlich werden im Rahmen der Einmessung die entsprechenden Einbauwinkel der Fächerlot-Transducer, der IMU, sowie des Kompass getrennt von einander und unabhängig von anderen Einflussgrößen bezogen auf das Sensorträgersystem (Schiffskoordinatensystem) S_B bestimmt.

Da die Winkel u. a. aus Koordinaten abgeleitet werden müssen, werden hierbei teilweise Standardmessunsicherheiten der Koordinaten von $<0,5$ mm gefordert. Dies stellt, insbesondere bei den Rahmenbedingungen auf einem Schiff und der entsprechenden Umgebung einer Werft, eine messtechnische Herausforderung dar.



Abb. 10: Vermessungsschiffe bei der Einmessung auf der Helling

Um diese Anforderung zu erreichen, müssen entsprechend geeignete Messsysteme und -verfahren aus dem Bereich der Ingenieurvermessung eingesetzt werden (Overath 2017 und Brüggemann 2014). Die Einmessung erfolgt über ein örtliches Messnetz unter Nutzung verschiedener Standpunkte (Abb. 11). Hierbei können unterschiedliche Messgeräte wie hochgenaue Tachymeter und Lasertracker zum Einsatz kommen. Die Koordinaten sowie deren Standardmessunsicherheiten werden im Rahmen der verschiedenen Verfahren der Netzausgleichungen und der anzuwendenden Formfittingmethoden bestimmt.

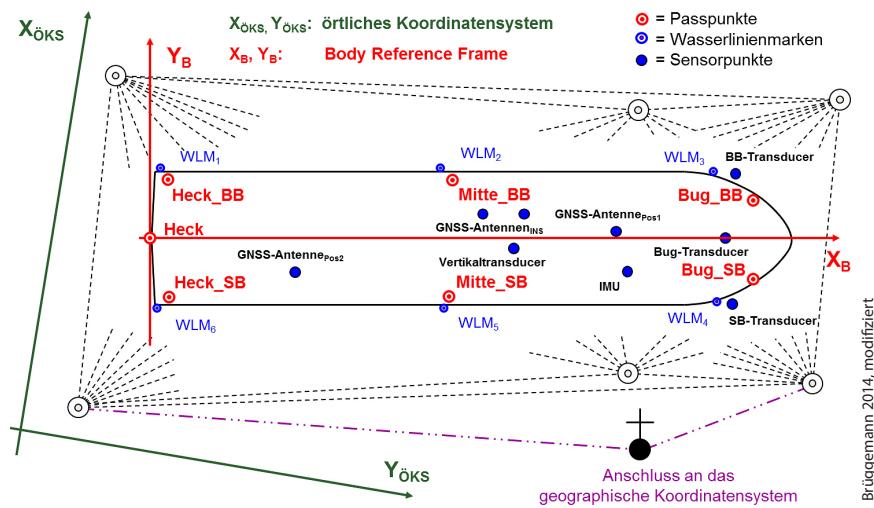


Abb. 11: Einmessungsskizze

3.1 Bestimmen der Einbauwinkel der IMU

Die Einbauwinkel der IMU ($IMU\text{-}Einbauwinkel}_{\text{Roll}}$, $IMU\text{-}Einbauwinkel}_{\text{Pitch}}$ und $IMU\text{-}Einbauwinkel}_{\text{Yaw}}$) sind die jeweiligen Drehwinkel des Sensor Reference Frame der IMU (S_{IMU}) gegenüber dem Schiffskoordinatensystem S_B (Abb. 12).

Aus den in Abb. 13 dargestellten Winkelbeziehungen können die Einbauwinkel mit Hilfe der folgenden Formeln berechnet werden:

$$IMU\text{-}Einbauwinkel}_{\text{Roll}} = \text{Mittelwert}_{\text{Roll}} - \text{Schieflage}_{\text{Roll}}, \quad (6)$$

$$IMU\text{-}Einbauwinkel}_{\text{Pitch}} = \text{Mittelwert}_{\text{Pitch}} - \text{Schieflage}_{\text{Pitch}}. \quad (7)$$

Dabei ist für die Berechnung der Schieflagen darauf zu achten, dass für den $IMU\text{-}Einbauwinkel}_{\text{Pitch}}$ zwei Passpunkte genutzt werden, die exakt auf der Schiffslängsachse – also der x-Achse von S_B – liegen. Für die Berechnung des $IMU\text{-}Einbauwinkel}_{\text{Roll}}$ hingegen sind zwei Passpunkte orthogonal dazu zu verwenden. Um

diese Bedingungen zu erreichen müssen einzelne Passpunkte ggf. auf die Schiffslängsachse projiziert werden. Dadurch wird gewährleistet, dass die beiden Winkel unabhängig voneinander bestimmt werden und keine Transformationen zwischen den einzelnen Berechnungsschritten notwendig sind.

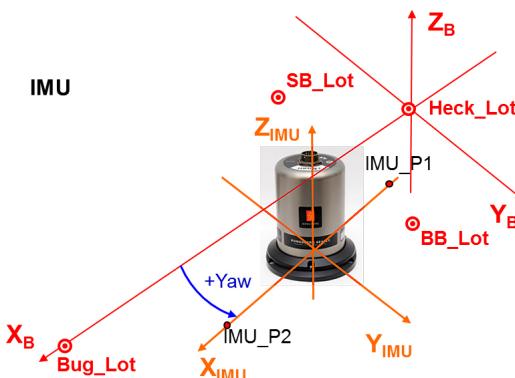


Abb. 12: Sensor Reference Frame der IMU

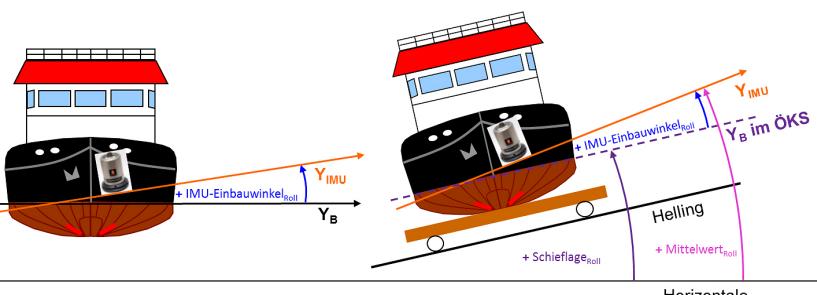


Abb. 13: Winkelbeziehung der IMU

Die mit der IMU im Rahmen der Einmessung auf der Helling gemessenen Roll- und Pitchwinkel sowie die ermittelten Mittelwerte für Roll und Pitch beziehen sich zunächst auf das lokale Horizontsystem. Da das Schiffskoordinatensystem S_B auf der Helling i. d. R. nicht horizontiert ist, muss die Schieflage des Schiffskoordinatensystems S_B gegenüber dem örtlichen horizontalen Koordinatensystem S_{OKS} z. B. mittels einer tachymetrischen Einmessung von Passpunkten bestimmt werden.

Damit die aufgezeichneten Roll- und Pitchwinkel auch die tatsächlichen Neigungswinkel repräsentieren, muss die X_{IMU} -Achse der IMU vor der Sensor-daten-Aufzeichnung parallel zur Schiffssachse (X_B) ausgerichtet werden. Die erfolgreiche Yaw-Ausrichtung ist entsprechend messtechnisch nachzuweisen. Ein mögliches Messverfahren hierzu wird von Brüggemann (2014) beschrieben. Sollte die Yaw-Ausrichtung nicht durch mechanische Ausrichtung des Sensors korrigiert werden können, müssen die gemessenen Roll- und Pitchwinkel entsprechend rechnerisch korrigiert werden.

3.2 Bestimmung des Einbauwinkels des Headinggebers

Ein beispielsweise aus GNSS-Messungen abgeleitetes Heading bezieht sich auf die geografische Nordrichtung im übergeordneten Koordinatensystem. Der Heading-Einbauwinkel berechnet sich aus der Differenz zwischen dem geografischen Azimut der X-Achse X_B (Sollrichtung) und dem Mittelwert des aufgezeichneten Headings (Istrichtung).

$$\text{Heading}_{\text{Einbauwinkel}} = \text{Azimut}_{\text{geogr. Nord}} - \text{Mittelwert}_{\text{Heading}} \quad (8)$$

Für die Bestimmung der Sollrichtung werden mindestens zwei im Schiffskoordinatensystem bestimmte Passpunkte in dem übergeordneten Koordinatensystem bestimmt und hieraus das Azimut der X-Achse abgeleitet. Wenn das Azimut aus UTM-Koordinaten abgeleitet wird, muss entsprechend die Meridiankonvergenz berücksichtigt werden.

Wenn die beiden GNSS-Antennen getrennt installiert sind, kann zur Kontrolle zusätzlich der Heading-Einbauwinkel aus den Schiffskoordinaten der beiden GNSS-Antennen berechnet werden (Abb. 14).

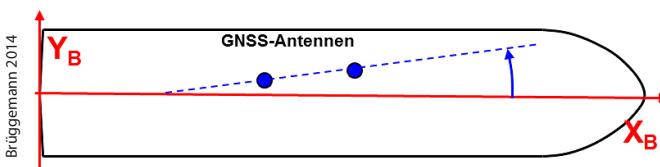


Abb. 14:
Bestimmung
Heading-
Einbauwinkel

3.3 Bestimmung der Einbauwinkel der Fächerlot-Transducer

Die für jeden einzelnen Transducer zu berechnenden Einbauwinkel (*Transducer-Einbauwinkel_{Roll}* (α), *Transducer-Einbauwinkel_{Pitch}* (β) und *Transducer-Einbauwinkel_{Gier}* (γ)) sind die Drehwinkel des jeweiligen Transducerkoordinatensystems S_T gegenüber dem Schiffskoordinatensystem S_B . Wie von Brüggemann (2014) ausführlich beschrieben, können die Einbauwinkel bei Fächerlot-Transducern beispielsweise aus vier auf der Transducerebene oder parallel hierzu liegenden Punkten P1 bis P4 bestimmt werden (Abb. 15). Die vier Punkte repräsentieren das Transducerkoordinatensystem S_T .

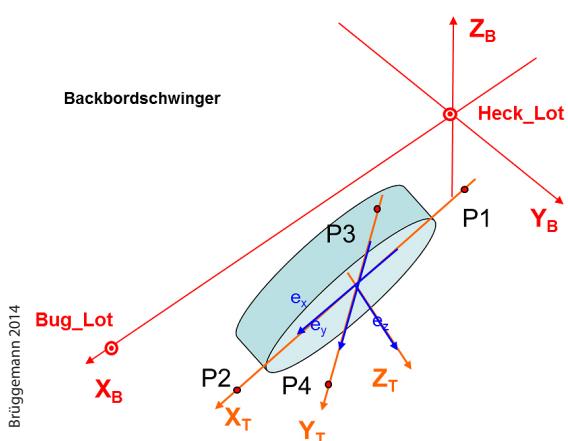


Abb. 15: Einbauwinkel Backbordtransducer

Der Abstand der Punkte ist abhängig von der geforderten Genauigkeit der Punktkoordinaten zu wählen. Um die geforderte Unsicherheit für die Einbauwinkel der Transducer von $0,1^\circ$

zu erreichen, dürfen die Komponenten der abgeleiteten Einheitsvektoren e_x , e_y und e_z eine entsprechende Maximal-Unsicherheit nicht überschreiten. Bei einem Punktabstand von 30 cm müssten die Koordinaten der Punkte beispielsweise eine Standardunsicherheit von 0,4 mm bzw. bei einem Punktabstand von 1 m von 1,2 mm haben. Die Vergrößerung der Punktabstände kann durch die Verwendung einer geeigneten Verlängerungslatte erreicht werden (Abb. 16).

Die Bestimmung der Punkte zur Ableitung der Einheitsvektoren e_x , e_y und e_z ist im Wesentlichen abhängig vom Transducertyp. In dem in der Abb. 16 abgebildeten Beispiel wurde eine 2 m lange Aluminiumplatte als Träger verwendet, auf deren Enden entsprechende Reflektoren aufgeklebt wurden. Die Verlängerung wurde für die Messung mit einer eigens angefertigten Halterung befestigt und ausgerichtet. Hierbei ist sicherzustellen, dass die Halterung parallel zur Transducerebene ausgerichtet ist. Um eine Kontrolle und einen Nachweis über die Unsicherheit der Ausrichtung der Verlängerungslatte zu erhalten, ist diese jeweils mindestens zweimal in Quer- und Längsrichtung zu befestigen und vom gleichen Gerätetestpunkt aus aufzumessen.



Abb. 16: Einmessung eines Transducers mit Verlängerungslatten

Zudem müssen die Einbauwinkel für jeden Transducer mindestens von einem zweiten Gerätestandpunkt aus bestimmt werden. Insbesondere bei geringen Punktabständen ergeben sich sehr hohe Anforderungen an die Standardsicherheiten der Koordinaten. Hierbei ist ggf. der Einsatz eines Lasertrackers für die Einmessung erforderlich (Overath 2017). In Abb. 17 wird eine Einmessung dargestellt, wobei die Passpunkte direkt über das Transducer-Frame bestimmt wurden. Über diese Punkte werden die Punkte P1 bis P4 zur Ableitung der Einheitsvektoren e_x , e_y und e_z bestimmt.

Die Einbauwinkel werden aus den jeweiligen vier Punkten P1 bis P4 über die Einheitsvektoren e_x und e_y sowie den Normaleneinheitsvektor e_z abgeleitet. Wenn sichergestellt ist, dass die Punkte P1 bis P4 mit ausreichender Genauigkeit eine Ebene bilden, können hieraus die Einheitsvektoren e_x und e_y berechnet werden. Der Einheitsvektor e_z ergibt sich aus dem Kreuzprodukt der Einheitsvektoren e_x und e_y . Damit die Einbauwinkel richtig berechnet werden können, ist sicherzustellen, dass die beiden Einheitsvektoren e_x und e_y senkrecht zueinander stehen.

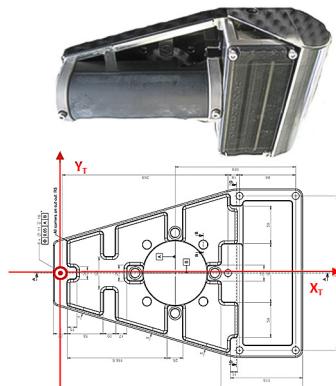


Abb. 17: Einmessung eines Transducers direkt über das Frame

Aus den Einheitsvektoren lässt sich die Drehmatrix R (Drehung des Transducerkoordinatensystems gegenüber dem Schiffskoordinatensystem) und deren Unsicherheitsmatrix aufstellen.

$$e_x = \begin{bmatrix} e_{x,1} \\ e_{x,2} \\ e_{x,3} \end{bmatrix}, \quad e_y = \begin{bmatrix} e_{y,1} \\ e_{y,2} \\ e_{y,3} \end{bmatrix}, \quad e_z = \begin{bmatrix} e_{z,1} \\ e_{z,2} \\ e_{z,3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$R_{(\gamma, \beta, \alpha)}^B = \begin{bmatrix} e_{x,1} & e_{y,1} & e_{z,1} \\ e_{x,2} & e_{y,2} & e_{z,2} \\ e_{x,3} & e_{y,3} & e_{z,3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Aus der Drehmatrix R lassen sich unter Berücksichtigung der entsprechenden Quadrantenregeln nach Wirth (2011) die Einbauwinkel berechnen.

$$\text{Transducer_Einbauwinkel_Roll: } \alpha = \arctan \left(\frac{e_{y,3}}{e_{z,3}} \right) \quad (11)$$

$$\text{Transducer_Einbauwinkel_Pitch: } \beta = \arctan \left(\frac{e_{x,3}}{\sqrt{e_{y,3}^2 + e_{z,3}^2}} \right) \quad (12)$$

$$\text{Transducer_Einbauwinkel_Gier: } \gamma = \arctan \left(\frac{e_{x,2}}{e_{x,1}} \right) \quad (13)$$

Für die abgeleiteten Einbauwinkel müssen nach Brüggemann (2014) die Standardunsicherheiten entsprechend bestimmt werden, wobei sich die Standardunsicherheiten der Einheitsvektoren aus den Koordinatenunsicherheiten nach der Ausgleichung ergeben. Exemplarisch wird hier die Formel zur Berechnung der Standardunsicherheit für die Roll-Komponente angegeben.

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\left(\left(\frac{1}{\left(\frac{e_{y,3}^2}{e_{z,3}^2} + 1 \right) \cdot e_{z,3}} \right)^2 \cdot \sigma_{e_{y,3}}^2 + \left(\frac{-e_{y,3}}{\left(\frac{e_{y,3}^2}{e_{z,3}^2} + 1 \right) \cdot e_{z,3}} \right)^2 \cdot \sigma_{e_{z,3}}^2 \right)} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (14)$$

Die Varianzfortpflanzung der Pitch- und Headingkomponente ist von Brüggemann (2014) ausführlich beschrieben. Wenn für die direkt am Transducer gemessenen Punkte eine Koordinatenunsicherheit von 0,5 mm erreicht wird, welches mit dem Einsatz eines Lasertrackers möglich ist, können die Einbauwinkel mit einer Unsicherheit von ca. 0,06° bestimmt werden.

4 Vergleich von Einmessung und Feldkalibrierung

Mit den vorgestellten Kalibrierverfahren können unterschiedliche Parameter bestimmt werden, wobei die Genauigkeiten der Ermittlungsergebnisse auch bei identischen Parametern durchaus verschieden sind. Mit Hilfe des *Patch-Tests* lässt sich lediglich die relative Orientierung des Primärsensors (z. B. Laserscanner, Kameras oder Fächerlot-Transducer) in Bezug auf das Sensorkoordinatensystem der IMU bestimmen. Durch die Einmessung hingegen werden die Koordinaten und Einbauwinkel aller Sensorträgerkoordinatensysteme bezogen auf das Body Frame ermittelt.

Es ist zu beachten, dass bei der Feldkalibrierung oft die Einbauwinkel des Primärsensors angepasst werden, um die einzelnen Messstreifen bestmöglich zur Übereinstimmung zu bringen. Sollte jedoch ein Einbauwinkel der IMU die Ursache der Ablagen in den Messstreifen sein und die Einbauorte der einzelnen Sensoren zudem große Exzentrizitäten haben, wird die Georeferenzierung der Daten mit falschen Winkeln durchgeführt. Dies kann bei der praktischen Nutzung des Messsystems zu systematisch fehlerhaften Positionen führen, die in den Messstreifen i. d. R. nicht direkt zu erkennen sind. Die fehlerhafte Georeferenzierung lässt sich nur auf lage- und höhenmäßig bekannten Sollflächen feststellen und prüfen. Auf Grund der Messunsicherheiten der 3D-Geländepunkte in Lage und Höhe lässt sich bei der Prüfung des Gesamtsystems jedoch nicht eindeutig feststellen, ob mögliche Abweichungen durch fehlerhafte Einbauwinkel oder beispielsweise durch die Unsicherheit der GNSS-Positionsbestimmung verursacht wurden. Dieses Defizit besteht bei hochgenauen geodätischen Einmessungen nicht.

In der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) werden auf den Vermessungsschiffen sowohl Dual-Head- als auch Triple-Head-Fächerlotssysteme eingesetzt. Um die Genauigkeitspotenziale dieser Messsysteme vollständig nutzen zu können, werden an die Unsicherheiten der Einbauwinkel der verschiedenen Sensoren die in [Tab. 3](#) genannten Mindestanforderungen bei 68 % Sicherheitswahrscheinlichkeit gestellt. Zudem werden in dieser Tabelle die erreichbaren Genauigkeiten der Feldkalibrierung und der Einmessung der Einbauwinkel, wie in den vorherigen Kapiteln ausführlich erläutert, zusammengefasst. Die erreichbaren Unsicherheiten können an dieser Stelle nur als durchschnittlich

Tab. 3: Anforderungen und erreichbare Unsicherheiten der Einbauwinkel

Anforderung	Feldkalibrierung	Einmessung
$\sigma_{T_EW_Roll}$	<0,10°	~0,02°
$\sigma_{T_EW_Pitch}$	<0,10°	~0,4°
$\sigma_{T_EW_Gier}$	<0,10°	~0,4°
$\sigma_{IMU_EW_Roll}$	<0,02°	–
$\sigma_{IMU_EW_Pitch}$	<0,02°	–
$\sigma_{IMU_EW_Yaw}$	<0,10°	–
$\sigma_{Heading_EW}$	<0,10°	–

erreichte Werte angegeben werden, da die tatsächlich erreichten Unsicherheiten sehr stark von den verschiedenen Rahmenbedingungen bei den Feldkalibrierungen sowie den Einmessungen abhängen. Entscheidend bei den geodätischen Einmessungen sind die Ergebnisse der Netzausgleichung, die entsprechenden Exzentrizitäten zwischen den Sensoren, sowie die Abstände der für die Berechnungen verwendeten Hilfspunkte. Es ist zu erkennen, dass die Feldkalibrierung gegenüber einer geodätischen Einmessung zu unsichereren Ergebnissen führt.

5 Fazit

Multisensorsysteme sollten im laufenden Betrieb grundsätzlich durch Feldkalibrierungen kontinuierlich geprüft werden. Die Ergebnisse der Feldkalibrierungen sind ein sehr guter Indikator dafür, ob sich ggf. Veränderungen am Messsystem ergeben haben. Insbesondere bei der Vielzahl der eingesetzten Sensoren, die zudem mit weit auseinanderliegenden Einbauorten wie z. B. auf einem Vermessungsschiff als Geräteträger installiert sind, lassen sich jedoch die Einbauwinkel der IMU und des Headinggebers durch die Feldkalibrierungen nicht eindeutig und nicht getrennt von den Einbauwinkeln des Primärsystems (z. B. der Fächerlot-Transducer) bestimmen. Die erstmalige Bestimmung der Einbauwinkel der verschiedenen Sensoren sollte immer im Rahmen der Inbetriebnahme des Vermessungssystems durch eine Einmessung erfolgen um den heutigen Genauigkeitsansprüchen Rechnung zu tragen.

Literatur

Brüggemann, T. (2014): Leitfaden für die Einmessung von hydrographischen Messsystemen auf Vermessungsschiffen. Koblenz: BfG, BfG-Bericht 1822.

- DIN 1319-1. (1995): Grundlagen der Messtechnik – Teil 1. Beuth Verlag.
- Filin, S. (2003): Recovery of Systematic Biases in Laser Altimetry Data Using Natural Surfaces. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 69, No. 11, 1235–1242.
- Godin, A. (1998): The Calibration of Shallow Water Multibeam Echo-Sounding Systems. Fredericton, N.B.: University of New Brunswick, Department of Geodesy and Geomatics Engineering.
- Hughes Clarke, J. E. (2003): A reassessment of vessel coordinate systems: what is it that we are really aligning? *US Hydrographic Conference Proceedings*. Biloxi, Mississippi.
- IHO (2005): Manual on Hydrography/Publication M-13 (1st Edition). Monaco: International Hydrographic Organization.
- Keller, F.; Sternberg, H. (2013): Multi-Sensor Platform for Indoor Mobile Mapping: System Calibration and Using a Total Station for Indoor Applications. *Remote Sensing*, 5, 5805–5824. DOI: [10.3390/rs5115805](https://doi.org/10.3390/rs5115805).
- Overath, T. O. (2017): Moderne Methoden zur Einmessung von Vermessungsschiffen. In: B. f. Gewässerkunde (Hrsg.): *Geodätische Beiträge zum Systemverständnis für Bundeswasserstraßen und sonstige Gewässer*. Koblenz.
- Seube, N.; Levilly, S.; De Jong, K. (2016): Automatic Estimation of Boresight Angles Between IMU and Multi-Beam Echo Sounder Systems. *Ocean Engineering & Oceanography*, 13–23. DOI: [10.1007/978-3-319-32107-3_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32107-3_2).
- Skaloud, J.; Lichti, D. (2006): Rigorous approach to bore-sight self-calibration. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 61, 47–59. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2006.07.003](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.07.003).
- Wheaton, G. E. (1988): Patch Test, a system check for multibeam survey system. *Third biennial U.S. Hydrographic Conference Proceedings*, (pp. 85–90). Baltimore, MD.
- Wirth, H. (2011): *Messunsicherheiten in der Gewässervermessung*. Koblenz: BfG, BfG-Bericht 1734.

Kontakt

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Brüggemann | Dr.-Ing. Thomas Artz | Dr.-Ing. Robert Weiß
Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz
brueggemann@bafg.de | artz@bafg.de | weiss@bafg.de

GNSS in der Hydrographie

Anja Heßelbarth

1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten nutzten immer mehr Schiffe für die präzise Positionierung bei hydrographischen Vermessungsaufgaben die Globalen Navigationssatelliten Systeme (GNSS). Die dafür geforderten Genauigkeiten und Zuverlässigkeit sind z.B. durch die *International Hydrographic Organization* (IHO) definiert. Im Gegensatz zu den meisten Vermessungsaufgaben sind für hydrographische Anwendungen vor allem die vertikalen Genauigkeiten (*Total vertical uncertainty*, TVU 95 % Vertrauensbereich) ausschlaggebend. Diese wiederum sind vom jeweiligen Messgebiet bzw. deren Tiefen abhängig. Für sicherheitskritische Messgebiete oder Anfahrten beträgt die geforderte vertikale Genauigkeit für 10 m Wassertiefen 0,26 m und für Wassertiefen bis zu 20 m 0,29 m. Die horizontale Genauigkeit (*Total horizontal uncertainty*, THU 95 % Vertrauensbereich) beträgt hingegen 2 m. In Häfen oder im Binnenland werden teilweise Genauigkeiten von kleiner als 1 dm verlangt. Auch in Gewässern mit Tiefen von bis zu 200 m wird immer noch eine vertikale Genauigkeit von kleiner als 1 m gefordert (IHO 2008, Böder et al. 2009).

Dieser Beitrag behandelt im [Kap. 2](#) verschiedene GNSS-Verfahren, deren Genauigkeiten sowie Limitierungen im Bereich der Hydrographie. Weiterhin werden für die jeweiligen Methoden Dienste bzw. Anbieter von Korrekturdaten präsentiert. Anschließend werden im [Kap. 3](#) spezielle Herausforderungen für hydrographische Anwendungen wie die Bereitstellung eines Kommunikationskanals und Einflüsse durch die Umgebung thematisiert. Einige Untersuchungen zu möglichen Genauigkeiten, Initialisierungszeiten usw. basierend auf aktuellen Messdaten folgen in [Kap. 4](#). Eine Zusammenfassung sowie aktuelle Entwicklungen und Trends in der präzisen Positionierung schließen diesen Beitrag ab.

2 GNSS-Verfahren

Die Genauigkeit verschiedener GNSS-Auswerte- und -Messmethoden ist davon abhängig wie gut verschiedene Fehlereinflüsse, welche die Beobachtungen beeinflussen, korrigiert bzw. modelliert werden können. Viele Effekte wie Satellitenbahn- und -uhrabweichungen sowie atmosphärische Effekte lassen sich durch Korrektur- bzw. Beobachtungsdaten einer Referenzstation bzw. eines

Referenzstationsnetzes minimieren oder teilweise eliminieren. Andere Effekte wie Mehrwege, Abschattungen oder Messrauschen, verursacht durch das Nah- und Fernfeld der GNSS-Antenne(n) müssen durch entsprechende Messanordnungen minimiert werden. Andere Fehlereinflüsse wie Phasenzentrumsvariationen bzw. Phasenzentrumsoffsets der Antenne lassen sich durch Kalibrierwerte reduzieren (Hofmann-Wellenhof et al. 2008).

Neben den verschiedenen Möglichkeiten Korrekturdaten oder Modelle zu verwenden, ist die Genauigkeit auch davon abhängig, welche Art von Beobachtungsdaten als Hauptmessgröße verwendet werden. Die Trägerphasenbeobachtungen sind um den Faktor 100 genauer als Codebeobachtungen. Dies bedeutet für die Positionierung eine Genauigkeitssteigerung von mindestens einer Größenordnung. Um mittels Phasenbeobachtungen eine cm-Genauigkeit erreichen zu können, ist es notwendig die Phasenmehrdeutigkeiten nach einer kurzen Initialisierungszeit festzusetzen (Hofmann-Wellenhof et al. 2008).

Wie schon in der Einleitung erwähnt, ist für hydrographische Anwendungen besonders die vertikale Komponente entscheidend. Aufgrund der Satellitengeometrie sowie der Fehlereinflüsse, die insbesondere die Höhe betreffen, ist die vertikale Komponente bei einer GNSS-Auswertung typischerweise um den Faktor zwei schlechter als die horizontale Komponente.

Die folgenden Unterkapitel fokussieren sich auf die phasenbasierenden Verfahren Real-Time Kinematic (RTK) sowie Precise Point Positioning (PPP) in Echtzeit. Codebasierte GNSS-Verfahren erreichen im Moment nicht die geforderten vertikalen Genauigkeiten. Die Nutzung des *European Geostationary Navigation Overlay Service* (EGNOS) ist mit einer vertikalen Genauigkeit von 2 bis 4 m (95 % Vertrauensintervall) nur bedingt für hydrographische Anwendungen geeignet (EGNOS 2011).

2.1 Real-Time Kinematik

RTK ist ein phasenbasierendes relatives GNSS-Auswerteverfahren welches in Echtzeit eine cm-genaue Positionsbestimmung ermöglicht (Abb. 1). Um diese Genauigkeit zu erreichen, sind präzise Korrekturdaten bzw. Beobachtungsdaten einer Referenzstation bzw. eines Referenzstationsnetzes notwendig. Weiterhin müssen für eine cm-genaue Positionierung die Trägerphasenmehrdeutigkeit in Echtzeit festgesetzt werden.

Diese Festsetzung kann allerdings durch Mehrwegeeffekte, Signalabrisse, Messrauschen oder atmosphärische Restfehler, insbesondere bei langen Basislinien zwischen Referenzstation und Rover, erschwert werden oder sogar fehlerhaft sein (Hofmann-Wellenhoff et al. 2008).

Um eine fehlerhafte Festsetzung der Mehrdeutigkeiten und somit eine fehlerhafte Positionierung zu vermeiden, können mittels einer Integritätsprüfung die

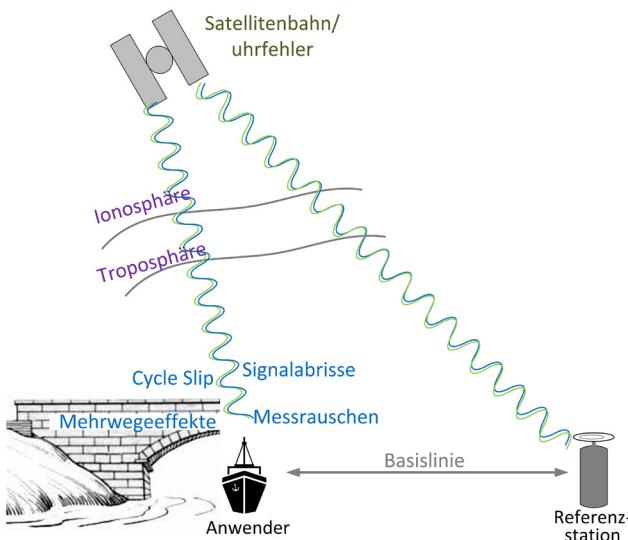


Abb. 1:
Prinzip: Real Time
Kinematic

festgesetzten Phasenmehrdeutigkeiten auf Plausibilität untersucht werden. Dafür sind in einem ersten Schritt mittels einer oder mehrerer Monitorstation(en) geprüfte Korrekturdaten der Referenzstation zu verwenden. Weiterhin ist es notwendig das Korrekturdatenalter mit in das Bewertungsschema einfließen zu lassen. Im nächsten Schritt kann durch verschiedene interne statistische Parameter der RTK-Auswertung, Ausreißertests sowie Sensorredundanzen die Integritätsbewertung fortgesetzt werden. Vielversprechende Entwicklungen fanden dazu im Verbundprojekt „Leit- und Assistenzsysteme für die sichere Schifffahrt auf Binnenwasserstraßen (LAESSI)“ statt. Durch die Bewertung der Phasenmehrdeutigkeiten konnte in diesem Projekt erreicht werden, dass Positionen, die eine geforderte max. Abweichung von 10 cm überschreiten, nicht für weitere sicherheitskritische Anwendungen verwendet werden (Heßelbarth et al. 2017).

Ein Nachteil für die Nutzung von RTK in der Hydrographie für Anwendungen auf hoher See ist die Limitierung der Basisliniengröße zwischen Rover- und Referenzstation. Insbesondere ionosphärische und troposphärische Restfehler beeinflussen ab einer Reichweite von ca. 20 bis 30 km die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten. Durch geeignete Modellierungen mittels Zweifrequenz-Beobachtungen oder Schätzung des ionosphärischen und troposphärischen Restfehlers sowie deren Gradienten lässt sich die Basisliniengröße zwischen Rover- und Referenzstation deutlich erhöhen (Takusa und Yasuda 2010, Kuba et al. 2012).

Des Weiteren wird mit zunehmender Basisliniengröße die Übertragung der Korrekturdaten erheblich erschwert bzw. ist mittels des üblichen globalen Systems für mobile Kommunikation (GSM) oder Internet nicht möglich. Kann

keine ausreichende Kommunikation zur Verfügung gestellt werden, bleibt oftmals nur eine Postprocessing Auswertung übrig, was allerdings auch bedeutet dass alle Beobachtungsdaten gespeichert und anschließend ausgewertet werden müssen. Die dafür notwendigen Ressourcen stehen allerdings oftmals nicht zur Verfügung (Ellmer 2013).

2.1.1 SAPOS

Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) realisiert mit über 270 Stationen den amtlichen Raumbezug. Die Daten dieser Stationen werden hauptsächlich für das Generieren von Echtzeitkorrekturdaten in Form einer physischen oder virtuellen Referenzstation genutzt. Die Lagegenauigkeit des hochpräzisen Echtzeit-Positionierungs-Service (HEPS) wird mit 1 bis 2 cm und die Höhengenauigkeit mit 2 bis 3 cm angegeben. Die Korrekturdaten beziehen sich auf den amtlichen Raumbezug, d. h. das Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989 (ETRS89). Standardmäßig werden Korrekturdaten für GPS und GLONASS angeboten (Jahn et al. 2017).

Die Korrekturdaten entsprechen dem internationalen standardisierten Radio Technical Commision for Maritime Services (RTCM)-Format, d. h. sie können von jedem üblichen Empfänger bzw. jeder üblichen Software verarbeitet werden. Die Übertragung der Datenströme wird mittels Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip) Technik über Internet oder über GSM realisiert.

Die Nutzung dieser Korrekturdaten ist in den meisten Bundesländern noch kostenpflichtig (www.sapos.de/dienste-im-ueberblick.html). Berlin (www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/sapos) und Thüringen (<https://sapos.thueringen.de>) bieten seit einiger Zeit die kostenfreie Nutzung dieses Services an. Bayern (https://sapos.bayern.de/lfps_register.php) stellt mittlerweile einen kostenfreien landwirtschaftlichen Fahrzeugpositionierungsdienst bereit. Wie sich diese Art der kostenfreien Bereitstellung von Korrekturdaten weiterentwickelt, werden die nächsten Jahre zeigen.

2.1.2 Private Anbieter

Ähnlich wie der SAPOS-Dienst generiert Trimble VRS Now Korrekturdaten basierend auf einem Netzwerk von permanenten Referenzstationen. Die ca. 175 Referenzstationen in Deutschland sowie den unmittelbaren Nachbarländern beziehen sich auf das ETRS89, den offiziellen Bezugsrahmen von Deutschland. Laut Trimble stehen im Gegensatz zu dem HEPS-Dienst von SAPOS Korrekturdaten für die GNSS GPS, GLONASS, Galileo, Beidou und *Quasi-Zenith Satellite System* (QZSS) zur Verfügung und können in Teilen von Europa sowie den USA und Australien genutzt werden. Die horizontale Genauigkeit wird mit

weniger als 2 cm (95 % Vertrauensbereich) und die Initialisierungszeit mit weniger als 1 Minute angegeben (Trimble 2018). Die Korrekturdaten werden über Internet bzw. GSM in unterschiedlichen Datenformaten u. a. auch RTCM übertragen, sodass jeder geodätischer Empfänger zur RTK-Positionierung genutzt werden kann (Wegener 2009).

HxGN SmartNet ist ein weltweit integrierter, zeitlich unabhängiger GNSS-Netzwerk RTK-Dienst basierend auf einem umfangreichen Referenzstationsnetz. Die Korrekturdaten werden im standardisierten RTCM-Format angeboten und können daher mit jedem Empfänger verarbeitet werden. Auch dieser Service verspricht die übliche RTK-Genauigkeit von wenigen cm (HxGN 2018).

2.2 Precise Point Positioning

PPP ist eine GNSS-Auswertetechnik, die mehr und mehr für die präzise Positionsbestimmung eingesetzt wird. Im Gegensatz zu RTK werden bei PPP keine lokalen Referenzstationen verwendet (Zumberge et al. 1997, Heßelbarth 2011). Vielmehr werden Korrekturdaten genutzt, welche aus einem großräumigen regionalen bzw. globalen Netz von Referenzstationen bestimmt werden (Abb. 2). Dies hat den Vorteil, dass die lokale bzw. regionale Begrenzung im Vergleich zu RTK aufgehoben wird. Der Nachteil von PPP ist allerdings, dass die hohen Genauigkeiten von wenigen cm stark von der Dauer der kontinuierlichen Phasenmessungen sowie den bereitgestellten Korrekturrichtungen abhängen. Die

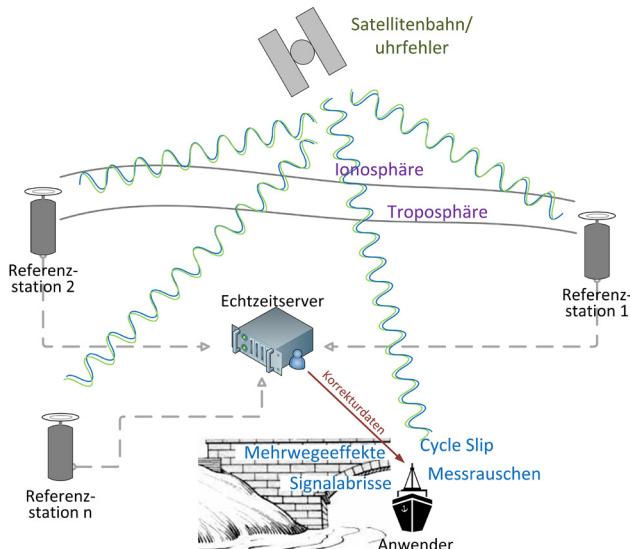


Abb. 2:
Prinzip: Precise
Point Positioning

Tab. 1: Inhalt SSR-Stufenplan nach Jahn et al. 2017

Stufe	Inhalt	Bemerkungen
1	Korrekturen für Satellitenbahnen, -uhren sowie Code-Bias der Satellitensignale	Standardisiert seit 2011 für GPS und GLONASS; dm-Genauigkeit nach langer Konvergenzzeit (ca. 30 min)
2	Phase-Biases der Satellitensignale und Vertical total electron content (VTEC)-Ionosphärenmodell	Phase-Bias ermöglicht PPP mit Mehrdeutigkeitsfestsetzung VTEC-Ionosphärenmodell ermöglicht Einfrequenz-Anwendungen
3	Slant total electron content (STEC)-Ionosphärenkorrektur und „Gridded Troposphäre“	Genauigkeitsniveau ähnlich RTK, Konvergenzzeit < 1 min

Mehrdeutigkeitsfestsetzung bei PPP, vor allem in Echtzeit, ist deutlich schwieriger als bei RTK. Das derzeitige Konvergenzverhalten kann bis zu 30 Minuten betragen (Heßelbarth 2011, Wanninger und Heßelbarth 2009, Kouba 2009, Hinterberger et al. 2015).

Ein wesentliches Kriterium für die Mehrdeutigkeitsfestsetzung und somit das Erreichen der präzisen Positionierung bei Echtzeit-PPP sind die verfügbaren Korrekturdaten in Echtzeit. Neben Satellitenuhr- und -orbitkorrekturen sind vor allem Biases und atmosphärische Korrekturen erforderlich. Für die Bereitstellung dieser Informationen wurde ein RTCM-Format definiert, welches die sogenannten *State Space Representation* (SSR)-Nachrichten als offenen, herstellerunabhängigen Standard beschreiben.

Für diese SSR-Standardisierung war folgender Stufenplan vorgesehen (Tab. 1). Allerdings ist die Fertigstellung dieses Stufenplans derzeit stark verzögert, was zur Folge hat, dass im Moment nur die Stufe 1 seit 2011 abgeschlossen ist. Die Stufe 2 wird diskutiert und ist daher noch in der Entwicklung. Die Bearbeitung der Stufe 3 hat noch nicht begonnen (Söhne 2017, Jahn et al. 2017). Dies hat zur Folge, dass mit den derzeitigen RTCM-Korrekturen nahezu keine Festsetzung von PPP-Mehrdeutigkeiten in Echtzeit möglich ist und somit die Konvergenzzeiten bis zu 30 Minuten betragen können.

2.2.1 Kostenfreie bzw. herstellerunabhängige Dienste

Der *International GNSS Service* (IGS) ist ein Zusammenschluss mehrere Organisationen, welcher seit mehr als 20 Jahren Beobachtungs- und Navigationsdaten als Dateien z. B. auf einem FTP-Server ([ftp://ftp.igs.org/pub/](http://ftp.igs.org/pub/)) bereitgestellt

(Kouba 2009). Seit April 2013 gibt es ein offizielles Projekt – den *IGS Real-Time Service* (IGS RTS) – welches sich mit der Aufarbeitung und dem Anbieten von Echtzeitprodukten beschäftigt (Agrotis et al. 2017, Söhne 2017).

Um die standardisierten SSR-KorrekturNachrichten nutzen zu können, muss sich der Anwender bei einem Anbieter wie z.B. dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) registrieren. Anschließend lassen sich die Beobachtungsdaten und Ephemeriden über einen Ntrip Client zur Positions berechnung nutzen. Dafür können auch verschiedene Software tools wie der BKG Ntrip Client (BNC) oder RTKLIB genutzt werden (Agrotis et al. 2017, Söhne 2017, Weber et al. 2016, Takasu 2010).

Die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltung der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) hat beschlossen SSR-Interoperabilitätstests aktiv zu unterstützen. Dafür wurde zusammen mit Geo++ GmbH eine deutschlandweite RTCM-Testumgebung realisiert, basierend auf der SAPOS-Infrastruktur. Seit 2016 stehen verschiedene deutschlandweite RTCM-SSR-Datenströme zu Testzwecken zur Verfügung. Erste Untersuchungen und Tests zu einer SSR-basierten Vernetzung im Bereich der Nordsee von seitens SAPOS in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie (BSH) fanden in den Jahren 2014 und 2015 statt. Dabei wurden Höhengenauigkeiten von besser als 10 cm erreicht (Jahn et al. 2017).

Andere vielversprechende Entwicklungen werden derzeit von Geo++ in Zusammenarbeit mit SAPOS bzgl. der Konvertierung von SSR zu RTK-KorrekturNachrichten (*Observation State Representation*, OSR) durchgeführt. D.h. die üblichen PPP spezifischen Korrekturdaten können nach einer sogenannten SSR2OSR-Konvertierung mit einem RTK fähigen Empfänger verarbeitet werden (Wübbena et al. 2017).

2.2.2 Kommerzielle Dienste

Fugro bietet einen hochgenauen PPP-Service an, welcher die GNSS-Systeme GPS, GLONASS, Beidou (seit 2015) und Galileo (seit 2016) integriert und speziell für maritime Anwendungen geeignet ist. Das sogenannte G4-Netzwerk besteht aus weltweit verteilten 45 Multi-GNSS-Stationen. Die Nutzung dieser vier Systeme hat den Vorteil, dass bei einer geringen Satellitenabdeckung oder größeren Abschattungen immer noch genügend Beobachtungen zur Verfügung stehen. Die Korrekturdaten werden über acht geostationäre Satelliten zur Verfügung gestellt, sodass ab einer geografischen Breite von kleiner als 75° mindestens zwei geostationäre Satelliten sichtbar sind. Diese übertragen die Korrekturen via L-Band und können mit Standard-GNSS-Antennen empfangen werden. Um diesen Korrekturservice von Fugro nutzen zu können, muss ein entsprechender Empfänger, welcher die Informationen des L-Band-Signal decodieren und

verarbeiten kann, vorhanden sein (Tegedor et al. 2017). Für statische Anwendungen werden die horizontale Genauigkeit mit ca. 1 bis 2 cm (1-sigma) bzw. 5,9 cm (95 % Vertrauensbereich) und die vertikale Genauigkeit mit 4 bis 5 cm (1-sigma) bzw. 10,1 (95 % Vertrauensbereich) angegeben. Die Konvergenzzeit beträgt ca. 20 Minuten und entspricht somit der üblichen PPP-Konvergenzzeit. Genauigkeitsuntersuchungen basierend auf Basislinienauswertungen zweier Antennen auf dem Schiff, lassen ein ähnliches Genauigkeitsniveau für kinematische Anwendungen vermuten (Tegedor et al. 2017, Visser 2015).

Die Trimble CenterpointRTX Technologie verspricht eine cm-genaue Positionierung basierend auf den Daten eines weltweiten Referenzstationsnetzes von 100 Stationen. Die Korrekturdaten für GPS, GLONASS, Galileo, QZSS und Beidou werden über geostationäre Satelliten oder einen Internetdatenstrom angeboten. Die angegebene Genauigkeit beträgt < 4 cm (95 % Vertrauensbereich) bei einer Konvergenzzeit von weniger als 30 Minuten, in einigen Regionen sogar weniger als 5 Minuten. Untersuchungen in Nordamerika über einen Zeitraum von mehreren Tagen zeigten eine horizontale Genauigkeit von 2,4 cm (95 % Vertrauensbereich) und eine vertikale Genauigkeit von 4,4 cm (95 % Vertrauensbereich) nach einer Konvergenzzeit von ca. 30 Minuten (Leandro 2011, Weinbach 2016).

Ein weiterer globaler PPP-Dienst namens StarFire wird von John Deere, einen der größten Hersteller von Landmaschinen, betrieben. Basierend auf weltweit verteilten Stationen werden Echtzeitkorrekturen für GPS- und GLONASS-Uhren und -Orbits sowie Biases für die Wideline und Narrowline Linearkombinationen durch die sieben StarFire-Satelliten übertragen. Die horizontale Genauigkeit wird mit 3 cm (95 % Vertrauensbereich) und die vertikale Genauigkeit mit 8 cm (95 % Vertrauensbereich) angegeben. Die Initialisierungszeit beträgt weniger als 30 Minuten kann aber durch einen zuverlässigen Quick Start reduziert werden (Söhne 2017, Dai et al. 2016).

3 Herausforderungen bei hydrographischen Anwendungen

Die im letzten Kapitel beschriebenen Genauigkeiten können nur erreicht werden, wenn gewisse Randbedingungen gegeben sind. Dies betrifft zum einen die Echtzeitübertragung der Korrekturdaten zum Schiff und zum anderen die Umgebungsbedingungen bzgl. der GNSS-Antenne.

3.1 Kommunikation

Die Korrekturdatenübertragung ist ein wesentlicher Bestandteil sowohl für das RTK-Verfahren als auch für Echtzeit-PPP-Anwendungen. Allerdings ist das

Datenvolumen für die Übertragung von PPP-Korrekturen im Vergleich zu RTK deutlich geringer. In Abb. 3 ist der Unterschied des zu übertragenden Datenvolumens zwischen RTK und PPP dargestellt. Aufgrund dessen, dass nicht jede Korrektur zu jeder Epoche übertragen wird, ist das Datenvolumen deutlich reduziert. Für RTK-Daten, basierend auf mehreren Frequenzen und Satellitenkonstellationen, sind derzeit Bandbreiten von mehr als 9600 Bit pro Sekunde erforderlich.

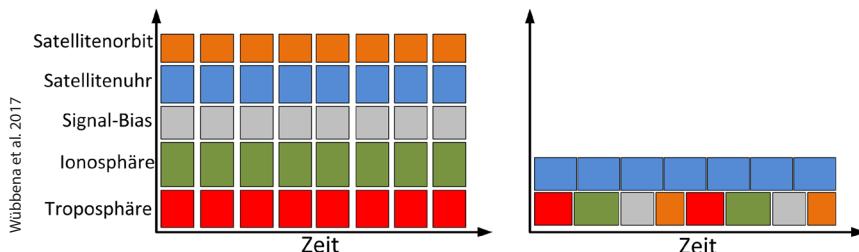


Abb. 3: Volumen der Korrekturdaten für RTK-OSR (rechts) und für PPP-SSR (links)

Eine gängige Kommunikationsmöglichkeit für RTK bzw. Netz-RTK ist die Nutzung von Mobilfunk im GSM-Standard bzw. die weitere Entwicklung des GPRS-Standards. Dies ermöglicht zum einen eine Übertragung von großen Datenmengen und zum anderen ist eine bi-direktionale Kommunikation zwischen Nutzer und Dienstleister möglich. Dies ist vor allem bei Netz-RTK für die Standpunktbestimmung der virtuellen Referenzstation (VRS) notwendig. Zur Übertragung der Korrekturdaten wird das Ntrip-Protocol verwendet. Ein Nachteil von GSM/GPRS ist die teilweise fehlende Abdeckung in dünn besiedelten Gebieten sowie küstenfernen Regionen (Wanninger 2005).

Eine andere Möglichkeit für die Korrekturdatenübertragung vor allem in Binnenbereich ist die Nutzung der *Automatic Identification System* (AIS)-Infrastruktur der Wasser und Schifffahrtsverwaltung (WSV). AIS ist im maritimen sowie Binnenbereich standardisiert und dient der Kommunikation zwischen Schiffen, sowie zwischen Schiffen und Land und umgekehrt. Aktuell kann AIS auch für die Übertragung von Codekorrekturen sowie Wasserstraßeninformationen genutzt werden (Messagetypr 17). Dieser Dienst wird von der WSV angeboten und ist für jeden kostenfrei (Hoppe 2006, Hoppe 2017). Eine geplante Erweiterung des AIS-Konzeptes (*VHF Data Exchange System*, VDES), verspricht eine deutlich größere Bandbreite die für eine erweiterte Korrekturdatenübertragung (z. B. auch Phasendaten) genutzt werden kann (Bober 2015).

Erste Untersuchungen bzgl. einer Erweiterung von AIS für die Übertragung von RTK-Korrekturdaten fanden im Rahmen des Projektes LAESSI statt. Auch wenn die Datenkanäle stark ausgelastet waren und die erforderlichen Update-

raten nicht immer erreicht wurden, war es dennoch möglich eine RTK-Positionsberechnungen durchzuführen (Hoppe 2018). Die nächsten Jahre werden diese Entwicklungen noch weiter vorantreiben, sodass dies eine echte Alternative zu GSM/GPRS vor allem im Binnenbereich aber auch mit seinen großen Reichweiten für die Küstenregionen sein kann.

Eine weitere Alternative Korrekturdaten zu übertragen, ist die Nutzung von geostationären Satelliten. Dies bietet sich vor allem für die hydrographische Vermessung küstenferner Gebiete an. Geostationäre Satelliten werden z. B. von *Satellite Based Augmentation Systems* (SBAS) genutzt. Die zu übertragenden Informationen werden auf ein L-Band aufmoduliert und können so von jedem Empfänger empfangen werden (EGNOS 2011).

Aber auch die beschriebenen Echtzeit-PPP-Dienste Fugro, Trimble Centerpoint RTX und StarFire nutzen zum Teil diese Art der Kommunikation für die Korrekturdatenübertragung (Tegedor et al. 2017, Leandro 2011). Dem Vorteil der Satellitenkommunikation einer stabilen Datenübertragung steht der Nachteil einer geringen Bandbreite gegenüber. Für die Übertragung von RTK-Korrekturen ist es daher eher nicht geeignet.

3.2 Effekte durch Umgebungsbedingungen

Umgebungsabhängige Effekte wie Mehrwege oder Abschattungen sind ein bedeutender Einflussfaktor bei der GNSS-Positionsberechnung. Bei Mehrwegeeffekten kommt es zu Überlagerungen des Satellitensignals durch Reflektoren nahe der Antennenumgebung (Görres 2017, Rost 2011). Im Gegensatz zu z. B. statischen Referenzstationen kommt es bei kinematischen Anwendungen neben den Änderungen der Satellitengeometrie auch zu Änderungen der Umgebungsbedingungen. Ebenso können Mehrwegeeffekte nicht durch lange Beobachtungszeiten herausgemittelt werden. Spezielle Antennen, wie z. B. ChokeRing-Antennen können ebenso nicht verwendet werden. Aufgrund dessen, sollte der Antennenstandpunkt sorgfältig ausgewählt werden. D. h. am höchsten Punkt des Schiffes mit möglichst wenigen Reflektoren wie z. B. Schiffsmasten, Kräne, Steuerhaus oder ähnliche Schiffsaufbauten. Ebenso empfiehlt es sich die Elevationsmaske auf mindestens 10° zu setzen und eine entsprechende Gewichtung bei der GNSS-Prozessierung zu verwenden. Eine weitere, wenn auch aufwendige Möglichkeit ist die Modellierung der Mehrwegeeffekte durch z. B. Analysen der Signalqualität oder der Phasenresiduen (Rost 2011, Lachapelle 2003, Lehner 2005).

Gerade bei hydrographischen Anwendungen im Binnenland und Häfen kann es auch zu Abschattungen oder Mehrwege durch Objekte entlang des Wasserweges kommen. Auch diese lassen sich nur schwer vermeiden und können auch nicht, wie zum Beispiel die Mehrwegeeffekte auf dem Schiff, modelliert werden.

Weiterhin kann es z. B. bei Brückendurchfahrten zu vollständigen Signalabrisse kommen. Daher ist es wichtig z. B. bei RTK-Verfahren immer wieder eine schnelle neue Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten zu erreichen. Um ein fehlerhafte Mehrdeutigkeitsfestsetzung zu vermeiden, sollte auch – wie schon in [Kap. 2.1](#) beschrieben – immer vorab eine Plausibilitätsprüfung stattfinden. Weiterhin kann auch eine inertiale Messeinheit (IMU) verwendet werden, um die Positionslösungen bei schwierigen Bedingungen, hervorgerufen durch Mehrwege oder Abschattungen, zu unterstützen oder Lücken in der Positionsberechnung, verursacht durch kurze Signalabrisse, zu überbrücken (Henkel und Sperl 2016).

4 RTK als Basis für hydrographische Anwendungen

Das DLR (Institut für Kommunikation und Navigation, Abteilung Nautische Systeme) hat sich in den letzten Jahren mit der Entwicklung von RTK-Algorithmen beschäftigt, welche neben Positions- und Navigationsinformationen auch Integritätsinformationen bereitstellen. Diese genauen und zuverlässigen Position- und Navigationsdaten können auch als Basis für hydrographische Anwendungen genutzt werden, wie [Kap. 4.1](#) zeigt.

4.1 Binnenland

Insbesondere für hydrographische Vermessungsarbeiten im Binnenbereich bietet sich derzeit die RTK-Positionsbestimmung an. Die Infrastruktur ist z. B. durch ein umfangreiches Netz von Referenzstationen (z. B. SAPOS) gegeben und auch die GSM-Abdeckung ist meist verfügbar. Ein derzeitiger Vorteil von RTK gegenüber PPP ist die kurze Initialisierungszeit nach kompletten Signalabrisse wie nach Brückendurchfahrten.

Im Rahmen des Projektes LAESSI wurden umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Initialisierungszeit durchgeführt. Für diese Analysen wurden für den Empfang der Rohdaten ein geodätischer GNSS-Empfänger (Javad Delta) sowie eine GNSS-Antenne (NavExperience) verwendet. Die RTK-Auswertung selbst wurde mit einer eigens entwickelten echtzeitfähigen Softwarelösung durchgeführt. [Abb. 4](#) zeigt den horizontalen und vertikalen Positionsfehler dieser RTK-Auswertung, basierend auf den Daten einer Messfahrt im April 2017 auf der Mosel in Koblenz. Die Herausforderung bei dieser mehrstündigen Messkampagne waren die drei Brücken innerhalb von 300 m. Die Referenztrajektorie, auf die sich die nachfolgenden Ergebnisse beziehen, wurde mittels eines zielverfolgenden Tachymeters bestimmt.

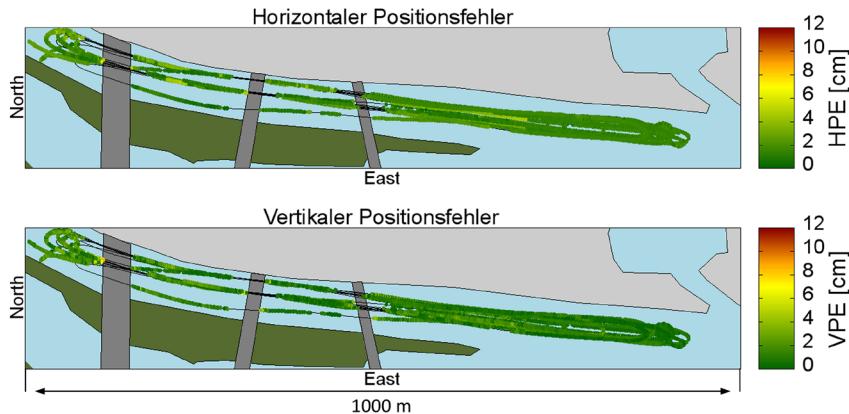


Abb. 4: Horizontaler und vertikaler Positionsfehler einer Messfahrt in Koblenz (Mosel), April 2017

Für die Darstellung des horizontalen und vertikalen Positionsfehlers wurden nur die auf Integrität geprüften RTK-Ergebnisse verwendet. Wie zu erkennen ist, konnten sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Position cm-ge nauige Ergebnisse erreicht werden, wobei die maximale Abweichung zur Referenz 7,3 cm bzw. 8,2 cm für die horizontale bzw. vertikale Komponente beträgt. Auch die stetige neue Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten nach Brückendurchfahrten beträgt durchschnittlich nur wenige Sekunden (< 10 Sekunden).

In Abb. 5 ist das Ost-Höhenprofil dieser Messfahrt für die DLR interne RTK-Lösung sowie für die RTK-Ergebnissen von kommerziellen Empfänger dargestellt. Als Vergleich dazu ist die Referenzlösung incl. einer Begrenzung für

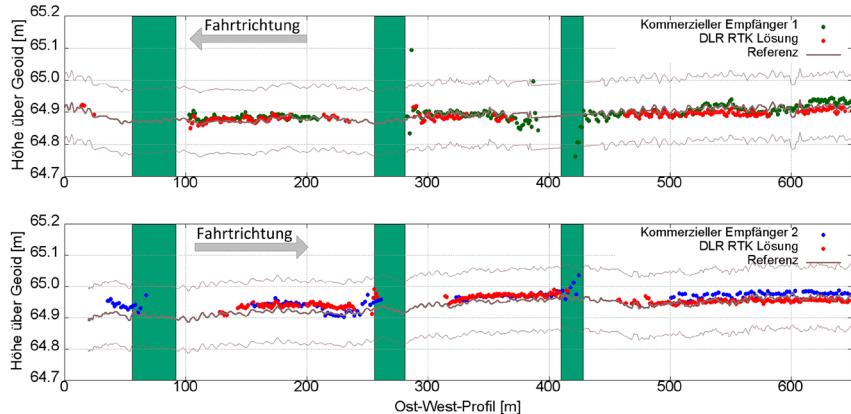


Abb. 5: Höhenprofile einer Messfahrt in Koblenz (Mosel), April 2017

die vorgegebene maximale Abweichung der vertikalen Komponente von ± 10 cm mit angegeben. Die Abbildung verdeutlicht nochmal, dass die Anforderung an die vertikale Genauigkeit erreicht ist und auch das Festsetzen der Mehrdeutigkeiten nach Brückendurchfahrten zügig erfolgt. Die DLR-RTK Auswertung ermöglicht darüber hinaus das Erkennen von Ausreißern im Vergleich zu kommerziellen Lösungen.

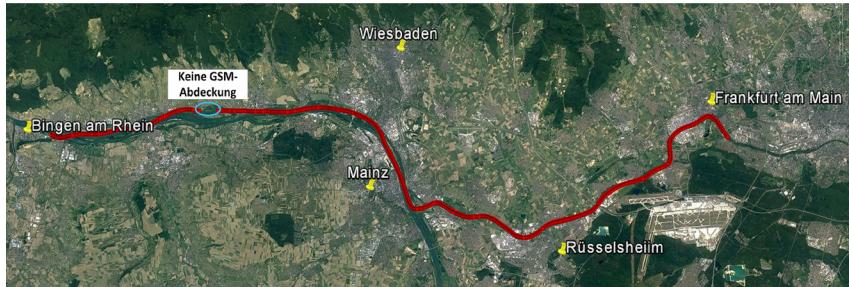


Abb. 6: Lageprofil Messfahrt El Nino, Februar 2018

Ebenfalls im Rahmen des Projektes LAESSI wurde die RTK Verfügbarkeit für weiträumigere Messfahrten untersucht. In Abb. 6 ist als Beispiel die Trajektorie basierend auf geprüften zuverlässigen RTK-Positionen in einem Zeitraum von mehreren Stunden und einem Fahrweg auf dem Main bzw. später Rhein von ca. 60 km dargestellt. Ein größerer GSM-Ausfall hat hier zu Folge, dass für ca. 2 km keine zuverlässige RTK-Positionierung verfügbar ist. Ist eine mobile Verbindung zur Datenübertragung vorhanden, beträgt die Verfügbarkeit von geprüften RTK-Positionen 97,2 %.

Das Höhenprofil in Abhängigkeit der Zeit ist in Abb. 7 dargestellt. Auch hier ist zu erkennen, dass auch unter schwierigeren Bedingungen z. B. in Schleusenbereichen eine zuverlässige präzise RTK-Positionsbestimmung möglich ist.

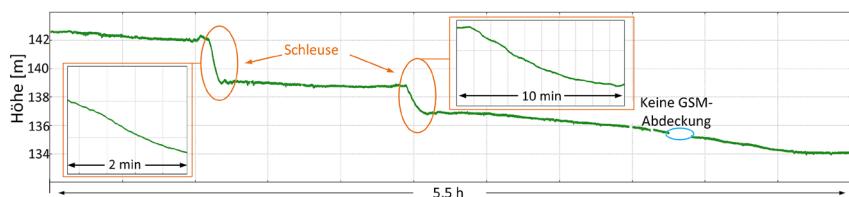


Abb. 7: Höhenprofil einer Messfahrt, Februar 2018

4.2 Maritime Anwendungen

Die RTK-Positionsbestimmung wird vor allem mit zunehmender Entfernung zur Referenzstation, welche sich üblicherweise an Land befindet, erschwert. In Abb. 8 ist als Beispiel die Trajektorie einer präzisen differenziellen Positionierung basierend auf den Daten einer Messfahrt zwischen Rostock und Trelleborg

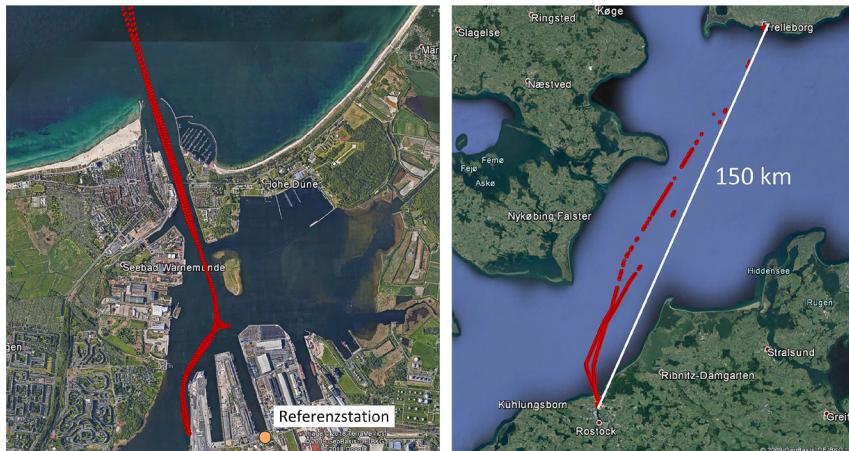


Abb. 8: Trajektorie der „Mecklenburg-Vorpommern“ zwischen Rostock und Trelleborg, März 2015

im März 2015 dargestellt. Auch hier sind nur die zuverlässigen Positionsdaten geplottet. Die Referenzstation befindet sich wie in der Abbildung erkennbar im Rostocker Hafen. Eine kontinuierliche Positionsbestimmung im Hafenbereich ist, wie im Bild rechts erkennbar, ohne Probleme durchführbar.

Da die Kommunikation nicht über eine Distanz von 150 km basierend auf der GSM-Übertragung möglich ist, konnte nur mit aufgezeichneten und anschließend zusammengeführten Daten eine präzise differenzielle Positionierung (linkes Bild) durchgeführt werden. Aufgrund dessen, dass die Auswertung nicht in Echtzeit erfolgte, wird der Begriff RTK an dieser Stelle vermieden, auch wenn der exakt identische Positionsalgorithmus verwendete wurde. Das bedeutet im Detail, dass auch keine Filterung, Glättung oder ähnliche Vorverarbeitung bei dieser Auswertung stattgefunden hat.

Der Fokus dieser Auswertung ist daher mehr auf die Anzahl der zuverlässig fixierten Mehrdeutigkeiten Tab. 2 zeigt die Anzahl der festgesetzten Mehrdeutigkeiten in Abhängigkeit der Basisliniennänge für vier Tage im Jahr 2015 an. Im Bereich von ca. 10 km, also für typische Anwendungen in Hafenbereichen oder Küstennähe bietet sich RTK mit einer Verfügbarkeit von ca. 99 % sowie

Tab. 2: Anzahl der festgesetzten Mehrdeutigkeiten [in %] in Abhängigkeit der Basislinienlänge, Jahr 2015

	Day of Year (DoY) 70	DoY 72	DoY 75	DoY 77
< 10 km	99,8 %	99,7 %	98,1 %	99,3 %
10 – 20 km	92,4 %	99,0 %	92,9 %	87,7 %
20 – 50 km	70,3 %	88,5 %	68,4 %	70,3 %
> 50 km	18,1 %	28,2 %	43,2 %	30,1 %

einer vorhandenen Infrastruktur für die Kommunikation als geeignetes Positionierungsverfahren an. Mit zunehmender Entfernung (ab ca. 20 km) wird die Anzahl der festgesetzten Phasenmehrdeutigkeiten deutlich geringer.

Auch oder gerade wegen den Herausforderungen im Bereich der Kommunikation sollte PPP als alternatives Verfahren für küstenferne Gebiete fokussiert werden, denn gerade in diesen Messgebieten liegen meist kontinuierliche Phasenbeobachtungen über viele Stunden vor.

Genauigkeitsuntersuchungen für PPP im Bereich der Hydrographie wurden 2009 durchgeführt. Auch wenn die Auswertungen damals im Post-Processing erfolgten, zeigte sich, dass mit Genauigkeiten von wenigen cm die Anforderungen für hydrographische Vermessungsaufgaben erfüllt sind (Wanninger und Heßelbarth 2009).

5 Zusammenfassung und zukünftige Entwicklungen

RTK ist ein Standardpositionierungsverfahren, welches insbesondere durch die gegebene Infrastruktur im Binnenbereich eingesetzt werden kann. Allerdings muss im Speziellen für sicherheitskritische Anwendungen eine zuverlässige Positionsbestimmung sichergestellt werden. Dies bedeutet dass neben der Bereitstellung der Positions- und Navigationsdaten auch eine interne Integritätsbewertung durchgeführt werden muss.

Allerdings gibt es vor allem bei sehr langen Basislinien Grenzen hinsichtlich der Phasenmehrdeutigkeitsfestsetzung und Kommunikation, sodass gerade für Anwendungen in küstenfernen Gebieten Echtzeit-PPP immer mehr an Bedeutung gewinnt oder gewinnen wird. Zahlreiche Dienste wie Fugro, Trimble CenterpointRTX oder Starfire bieten Korrekturdaten an, welche dem Nutzer nach einer Konvergenzzeit von ca. 20 bis 30 Minuten eine dm-cm-genaue Position ermöglicht. Im Gegensatz dazu ist die Standardisierung eines herstellerunabhängigen

gen Formates nahezu zum Stillstand gekommen, wodurch die Entwicklung eines möglichen kostenfreien Dienstes gebremst wird. Es bleibt abzuwarten wie z.B. die Entwicklung des SAPOS SSR-Dienstes vorangeht.

Eine beachtliche Entwicklung von präzisen Positionierungsdiensten ist deutlich erkennbar. Erwähnenswert ist hier vor allem der relativ junge Zusammenschluss der Firmen Bosch, Geo++, Mitsubishi Electric und u-blox zu Sappcorda (www.sappcorda.com). Dieser Zusammenschluss hat sich als Ziel gesetzt einen hochpräzisen GNSS-Positionsservice für Massenmarktanwendungen anzubieten.

Interessant ist auch die Entwicklung des Centimeter Level Augmentation Service (CLAS, http://qzss.go.jp/en/overview/services/sv06_clas.html) in Japan zu verfolgen. Basierend auf dem Referenznetz deren QZSS verspricht dieser Service eine cm-genaue Positionierung. Der Startpunkt für die operationelle Phase war für den April 2018 angegeben.

Nicht zu vergessen ist der Markt der *Low-Cost* Empfänger, der in den nächsten Jahren noch stärker voranschreiten wird. Auch hier wird sich zeigen wie stark diese Entwicklung die Bereitstellung von möglicherweise kostenfreien Korrekturdaten fördert.

Literatur

- Agrotis, L.; Schoenemann, E.; Enderle, W.; Caissy, M.; Rülke, A. (2017): The IGS Real Time Service. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe, Band 87, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Bober, S. (2015): AIS next generation – the development of the VHD data exchange system (VDES) for maritime and inland navigation. In: Smart Rivers. Buenos Aires, Argentina 2015.
- Böder, V. (2009): GNSS-Anwendungen in einem hydrographischen Multisensorsystem. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen. DVW-Schriftenreihe, Band 57, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Dai, L.; Chen, Y.; Lie, A.; Zeitzew, M.; Zhang, Y. (2016): StarFire SF3: Worldwide Centimeter-Accurate Real-Time GNSS Positioning. ION GNSS+ 2016. Portland.
- EGNOS (2011): User Guide for EGNOS, Application Developers. ED 2.0, 15/12/2011.
- Ellmer, W. (2013): RTK in Referenznetzen auf See – Fokus Kommunikation. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2013 – Schneller. Genauer. Effizienter. DVW-Schriftenreihe, Band 70, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Görres, B. (2017): Die GNSS-Empfangsantenne und ihre Wechselbeziehung mit der Stationsumgebung. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe, Band 87, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Henkel, P.; Sperl, A. (2016): Precise RTK-Positioning with GPS/INS Tight Coupling and Multipath Estimation. Proc. Of ION/IEEE Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Savannah, GA, USA.

- Heßelbarth, A. (2011): Statische und kinematische GNSS-Auswertung mittels Precise Point Positioning (PPP). Dissertation. Deutsche Geodätische Kommission, C-667, München 2011, ISSN 0065-5325, ISBN 978-3-7696-5079-2.
- Heßelbarth, A.; Ziebold, R.; Sandler, M.; Alberding, J.; Uhlemann, M.; Hoppe, M.; Bröschel, M. (2017): Towards a reliable bridge collision warning system for inland vessel navigation based on RTK height determination. ION GNSS+ 2017, Portland.
- Hinterberger, F.; Weber, R.; Huber, K.; Lesjak, R. (2015): Ambiguity fixing in real-time PPP – Determination of uncalibrated phase delays using a regional network. In: Vermessung & Geoinformation 2+3/2015.
- Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Wasle, E. (2009): GNSS Global Navigation Satellite Systems. Springer-Verlag Wien, New York.
- Hoppe, M. (2006): DGPS Dienst der WSV. Information zur Auswahl von GPS/DGPS Empfängern.
- Hoppe, M. (2017): GNSS-Anwendungen in der Schifffahrt. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe, Band 87, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Hoppe, M.; Sandler, M.; Heßelbarth, A.; Ziebold, R.; Alberding, J.; Uhlemann, M.; Bröschel, M.; Burmisova, L. (2018): Driving Assitance Systems for Inland Vessels based on High Precision DGNSS. IALA-Konferenz 2018, Südkorea.
- HxGN SmartNet (2018): <https://hxgnsmartnet.com/de-de>, letzter Zugriff 04/2018.
- IHO Standards for Hydrographic Surveys (2008): Special Publication. No. 44. Published by the International Hydrographic Bureau Monaco.
- Jahn, C.-H.; Riecken, J.; Trautvetter C.; Freitag, M; Kurtenbach, E.; Fabian, G.; Dick, H.-G. (2017): Quo vadis SAPOS? – Zukünftige Entwicklungen des Positionierungsdienstes der Landesvermessung. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe, Band 87, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Kouba, J. (2009): A guide to using International GNSS Service (IGS) products. <http://acc.igs.org/UsingIGSProductsVer21.pdf>.
- Kubo, Y.; Tanaka, H.; Ohasi, M.; Sugimoto, S. (2012): Long Baseline GNSS Relative Positioning with estimation ionospheric and tropospheric delays and theirs gradients. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Volume 8, Number 3(B), March 2012.
- Lachapelle, G.; Julien, O.; MacGougan, G.; Cannon, E. (2003): Ship Multipath Detection Experiments. Annual Meeting, The Institut of Navigation, Albuquerque, June 2325.
- Leandro, R., Landau, H. (2011): Proceedings of the 24th International Technical meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, September, 2011.
- Lehner, A.; Steingass, A. (2015): A Novel Channel Model for Land Mobile Satellite Navigation. ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division, 13–16 September 2005, Long Beach, CA.
- Rost, C. (2011): Phasenmehrwegereduzierung basierend auf Signalqualitätsmessungen geodätischer GNSS-Empfänger. Dissertation. Deutsche Geodätische Kommision. C-665, München 2011, ISBN 978-3-7696-5079-2.
- Söhne, W. (2017): Zum Status von Precise Point Positioning (PPP). In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe, Band 87, Wißner-Verlag, Augsburg.

- Takasu, T. (2012): Real-time PPP with RTKLib and IGS real-time satellite orbit and clock. IGS-Workshop, Newcastle, Großbritanien.
- Takasu, T.; Yasuda, A. (2010): Kalman-Filter-Based Integer Ambiguity Resolution Strategy for Long-Baseline RTK with Ionosphere and Troposphere Estimation. ION NTM, 2010.
- Tegedor, J.; Ørpen, O.; Melgård, T.; Łapucha, D.; Visser, H. (2017): G4 Multi-constellation Precise Point Positioning Service for High Accuracy Offshore Navigation. *TransNav. The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. Volume 11. Number 2, September 2017.
- Trimble VRSNow (2018): www.trimble.com/positioning-services/vrs-now, letzter Zugriff 04/2018.
- Visser, H.; Buttress, R (2015): Marinestar GNSS Augmentation Services. Fugro Satellite Positioning. Hydrographic Society South West Plymouth 2015.
- Wanninger, L.; Heßelbarth, A. (2009): GNSS Precise Point Positioning und seine Anwendung in der Hydrographie. In: DVW e. V. (Hrsg.): *Hydrographie – Neue Methoden von der Erfassung zum Produkt*. DVW-Schriftenreihe, Band 58, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Weber, G.; Mervat, L.; Stürze, A.; Rülke, A.; Stöcker, D. (2016): BKG Ntrip Client (BNC) Version 2.12. Mitteilungen des Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Band 49, ISBN 978-3-86482-083-0.
- Wegener, V. (2009): Trimble VRS Now – RTK einfach nutzen. In: DVW e. V. (Hrsg.): *GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen*. DVW-Schriftenreihe, Band 57, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Weinach, U.; Brandl, M.; Chen, X.; Drescher, R.; Glocker, M.; Landau, H.; Pastor, F.; Reusner, N.; Thomas, K. (2016): Triple Frequency PPP with Trimble CenterPointRTX. ION GNSS+ 2016. Portland.
- Wübbena, G.; Wübbena, J.; Wübbena, T.; Schmitz, M. (2017): SSR Technologie for Scalable Real-Time GNSS Application. IGS Workshop 2017. Paris Diderot University.
- Zumberge, J.; Heflin, M.; Jefferson, D.; Watkins, M.; Webb, F. (1997): Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research* 102.

Kontakt

Dr.-Ing. Anja Heßelbarth

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Kommunikation und Navigation, Abteilung Nautische Systeme
Kalkhorstweg 53, 17235 Neustrelitz
anja.hesselbarth@dlr.de

Fachwortschatz der Hydrographie

Lars Schiller

1 Einleitung

Der Fachwortschatz eines Fachgebiets ist typischerweise in Fachwörterbüchern verzeichnet. Für die Hydrographie gibt es nur wenige Fachwörterbücher. Diese sind entweder veraltet, nicht sehr umfangreich oder sie verzeichnen irrelevante oder fachfremde Fachwörter. Die größte Schwäche eines Fachwörterbuchs ist seine benennungsorientierte Organisation. Besser geeignet für die zusammenhängende Darstellung des Fachwortschatzes ist eine begriffsorientiert aufgebaute Terminologiedatenbank. In ihr lässt sich das Wissen über die Gegenstände und Begriffe sowie über die sie bezeichnenden Fachwörter dokumentieren. Zum Wissen gehört nicht nur die Kenntnis über den Inhalt jedes einzelnen Begriffs, das heißt über seine Definition, sondern vor allem die Kenntnis über die Beziehungen zwischen den Begriffen. Diese Beziehungen können in Begriffssystemen dargestellt werden. Diese Begriffssysteme wiederum ermöglichen es zu analysieren, wie das Wissen der Hydrographie strukturiert ist.

2 Fachsprache und Fachwortschatz

Jedes Fachgebiet hat eine eigene Fachsprache, auch die Hydrographie. Hydrographen nutzen ihre Fachsprache, um sich möglichst klar und effizient zu verständigen. Ihre Fachsprache ist geprägt durch spezielle Fachwörter, je nach Sprachraum z. B. *Seekartennull*, *fairsheet*, *WCI*. Diese Fachwörter fördern die eindeutige und ökonomische Fachkommunikation. In ihrer Gesamtheit bilden sie den Fachwortschatz, auch Terminologie genannt. Dieser Fachwortschatz wächst kontinuierlich, bedingt durch fortschreitende Spezialisierung und technische Entwicklungen.

Der aktuelle Stand des Fachwortschatzes der Hydrographie ist nirgendwo zusammenhängend dokumentiert. Hydrographen haben daher keine Möglichkeit, sich umfassend in einem Nachschlagewerk über den Fachwortschatz zu informieren. Vielmehr müssen sie sich in unterschiedlichen Quellen Informationen zusammensuchen. Das erschwert die Auseinandersetzung mit dem Fachwortschatz erheblich, die jedoch unabdingbar ist für jeden, der sich mit Fachtexten beschäftigt, egal ob er liest, selbst schreibt oder übersetzt (Drewer und Schmitz 2017, S. 6).

Damit Fachkommunikation gelingt, müssen die Gesprächspartner ein gemeinsames Verständnis der verwendeten Fachwörter haben. Sie müssen die Bedeutung jedes einzelnen Fachworts im jeweiligen Kontext kennen. Fachwörter muss man lernen, zunächst während der Ausbildung, später im Berufsleben. Und erst recht in der Fremdsprache. Erschwert wird die Fachkommunikation dadurch, dass es für Fachwörter oft zusätzliche Synonyme gibt und dass manche Fachwörter mehrere Bedeutungen haben. Aus diesem Grund gibt es Bestrebungen, normierend auf den Fachwortschatz einzuwirken.

3 Begriff und Fachwort

Terminologen unterscheiden zwischen Begriff und Fachwort. Ein Begriff ist eine von der Sprache unabhängige Denkeinheit, die eine Vorstellung von einem Gegenstand hervorruft, wobei der Gegenstand sowohl konkret und materiell (z. B. ein Sedimentecholot) als auch abstrakt und immateriell sein kann (z. B. die Kalibrierung). Daher kommt die Redewendung: „sich einen Begriff von einer Sache machen“. Sobald man etwas begriffen hat, ist man in der Lage, den Begriff mit einer Definition zu bestimmen. Anschließend kann man den Begriff mit einem Fachwort bezeichnen.

Manchmal gibt es mehrere Fachwörter für einen Begriff – man spricht dann von Synonymen. Für die sprachliche Einheit, die einen Begriff bezeichnet – das Fachwort –, gibt es mehrere Synonyme, z. B. *Benennung*, *Bezeichnung*, *Fachausdruck*, *Terminus*. Das Fachwort, das in einer anderen Sprache für denselben Begriff steht, nennt sich *Äquivalent*. Englische Äquivalente für *Fachwort* sind z. B. *term*, *expression* und *designation*. Das englische Äquivalent zum deutschen Fachwort *Begriff* lautet *concept*.

Weshalb die Unterscheidung zwischen Begriff und Fachwort so wichtig ist, wird klar, wenn man sich die Einträge in Fachwörterbüchern im Vergleich zu einer Terminologiedatenbank anschaut ([Kap. 4.5](#) und [Kap. 5](#)).

4 Fachwörterbücher

Falls jemand ein Fachwort nicht kennt oder ihm die exakte Bedeutung nicht klar ist, muss er nachschlagen. Heutzutage sucht er meist im Internet. Doch Suchmaschinen liefern überwiegend Treffer, die nichts mit Hydrographie zu tun haben. Besser ist es daher, ein Fachwörterbuch zu konsultieren.

Ein Fachwörterbuch ist ein papiergebundenes oder elektronisches Nachschlagewerk, in dem Fachwörter eines bestimmten Fachgebiets verzeichnet sind. Unterschieden wird grob zwischen einsprachigen Fachwörterbüchern, in denen

die Bedeutung jedes Fachworts erklärt ist, und mehrsprachigen Fachwörterbüchern, die zu jedem Fachwort ein Äquivalent in einer anderen Sprache angeben und nur manchmal erläutern, was das Fachwort bedeutet.

4.1 Wo kann man nachgeschlagen?

Es gibt nur wenige spezialisierte Nachschlagewerke, in denen Fachwörter der Hydrographie versammelt sind. Meist sind sie älteren Datums und verzeichnen zum Teil irrelevante und veraltete Fachwörter.

Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) hat das *FIG-Fachwörterbuch* herausgegeben. Band 11 mit dem Titel *Hydrographische Vermessung* ist 1999 erschienen (BKG 1999). Das Werk basiert auf einem bereits 1971 veröffentlichten „Manuskriptdruck“ (IfAG 1971). In diesem vergriffenen Fachwörterbuch sind rund 200 Einträge verzeichnet, jeweils in Deutsch, Englisch und Französisch.

Sehr viel mehr Einträge umfasst das *Hydrographic Dictionary*, das 1994 von der International Hydrographic Organization (IHO) veröffentlicht wurde (IHO 1994). In ihm sind etwas über 6000 englische Fachwörter verzeichnet. Zusätzlich gibt es seit dem Jahr 2007 eine Ergänzung mit rund 150 Fachwörtern aus dem Umfeld von ECDIS (IHO 2007). Zwar ist das *Hydrographic Dictionary* mittlerweile auch online in einer Datenbank verfügbar, doch bis auf ein paar wenige Ausnahmen sind die Einträge seit 1994 unverändert. Die Definitionen wurden nicht aktualisiert, veraltete Begriffe nicht gekennzeichnet, neue Begriffe – mit Ausnahme der ECDIS-bezogenen – nicht aufgenommen.

Aktuell ist nur die DIN 18709-3, die Begriffe der „Gewässervermessung“ erläutert (DIN 2012). Diese Norm jedoch deckt mit ihren knapp 170 Einträgen nur einen kleinen Teil des tatsächlichen Fachwortschatzes ab.

Darüber hinaus gibt es weitere Nachschlagewerke, in denen überwiegend fachfremde Einträge verzeichnet sind, aber auch einige wenige mit Bezug zur Hydrographie. Dazu gehören das *Lexikon der Kartographie und Geomatik* (Spektrum 2001), das *Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik* (Springer 2014) und das *GI-Lexikon*, in dem aber gerade mal 43 Einträge zum Themengebiet verzeichnet sind (Uni Rostock 2001–2016).

Während im *FIG-Fachwörterbuch* und in der DIN 18709-3 viel zu wenige Fachwörter verzeichnet sind, wurden in das *Hydrographic Dictionary* viel zu viele aufgenommen. Offenbar bestanden keine klaren Kriterien für die Entscheidung, was ein Fachwort der Hydrographie ist und was nicht. Stattdessen sind Hunderte Einträge aufgenommen worden, die benachbarten Fachgebieten zuzuordnen sind, z. B. *abeam* (für *querschiff*) und *Zulu time* (als Synonym für *Universal Time*), um nur den ersten und den letzten Eintrag zu nennen (IHO 1994).

Genauso wenig hilfreich sind Einträge, die heute nicht mehr von Bedeutung sind, etwa die Einträge im Kontext der Funkortung; im *FIG-Fachwörterbuch* sind das z. B. *Consol-Verfahren*, *Decca-Kette*, *Loran-Karte* (BKG 1999).

4.2 Aus welchen Gründen wird nachgeschlagen?

Nachschlagewerke werden aus verschiedenen Anlässen zurate gezogen:

- Ein Fachwort ist geläufig – etwa *Seekartennull* –, doch die Frage nach der exakten Definition kommt auf.
- Ein Fachwort ist unbekannt – etwa die Abkürzung *WCI* –, gesucht ist die Definition.
- Ein Fachwort in einer Fremdsprache ist unbekannt – etwa *fairsheet* –, gesucht ist eine Definition sowie das Äquivalent in der eigenen Sprache.
- Ein Fachwort ist bekannt – etwa *Seekartennull* –, für Übersetzungszwecke ist das Äquivalent in einer anderen Sprache gesucht.
- Die Definition zu einem Begriff ist bekannt – etwa „Aufzeichnung und Darstellung des Geschehens in der Wassersäule“ –, gesucht ist das treffende Fachwort.
- Mehrere Synonyme sind bekannt – etwa *chart datum*, *nautical chart datum* und *sounding datum* –, gesucht ist eine Empfehlung, welches Fachwort in welcher Schreibweise bevorzugt verwendet werden sollte.

4.3 Was wird nachgeschlagen?

Drei Beispiele sollen verdeutlichen, was Hydrographen heute finden können, wenn sie im Internet und in Fachwörterbüchern recherchieren.

Beispiel: Seekartennull

In einem Beitrag kommt das Fachwort *Seekartennull* vor. Der Leser weiß, dass es sich dabei um den Bezugshorizont handelt, auf den sich die Tiefenangaben in einer Seekarte beziehen. Er weiß auch, dass es mehrere Ansätze gab, das Seekartennull festzulegen, und er meint sich zu erinnern, dass es sich in der Nordsee seit einiger Zeit auf LAT (lowest astronomical tide) bezieht. Von einer Definition erhofft er sich Klarheit.

Internetrecherche: Die Suche im Internet liefert bereits auf der ersten Seite brauchbare Ergebnisse:

- Wikipedia – der erste Treffer – erklärt etwas langatmig, was das Seekartennull ausmacht, und bestätigt den Bezug auf LAT für die Nordsee. Außerdem kennt

es die Abkürzung *SKN*, das Synonym *Kartennull* sowie das englische Äquivalent *chart datum* (Wikipedia 2018).

- Der zweite Treffer führt zu einem Glossar vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), das jedoch nur eine allgemeine Definition bereithält (BSH 2018).
- Der nächste Link ist ein Volltreffer. In einem Flyer (PDF-Dokument) wird genau erklärt, wie das Seekartennull seit dem Jahr 2005 nordseeweit definiert ist (BMVI 2014).
- Das *Lexikon der Kartographie und Geomatik*, das auch online gefunden wird, wartet mit einer Definition aus dem Jahr 2001 auf, die mittlerweile überholt ist, weil sie noch das Mittlere Spring-Niedrigwasser als Bezug angibt. Zusätzlich wird die Abkürzung *SKN* und das englische Äquivalent *chart datum* angegeben (Spektrum 2001).
- Die Definition im online zugänglichen *GI-Lexikon* fällt allgemein aus, sie nennt dafür eine weitere Abkürzung, *KN*, und zwei englische Äquivalente: *nautical chart datum* und *sounding datum* (Uni Rostock 2001–2016).

Literaturrecherche: Die Recherche in spezialisierten Nachschlagewerken liefert kaum neue Erkenntnisse:

- Die *DIN 18709-3* definiert das Seekartennull zunächst allgemein als „Bezugsfläche für die Tiefenangaben einer Seekarte“. Eine Anmerkung liefert etwas mehr Information: „In Gezeitengebieten stimmt das SKN nicht mit dem NN. der dt. Landesvermessung überein, sondern ist gleich der Höhe des niedrigsten Niedrigwassers, das für einen Pegel auf der Grundlage der ermittelten, örtlich herrschenden Gezeitenbedingungen vorausberechnet werden kann“ (DIN 2012).
- Das niedrigste Niedrigwasser bringt den Leser auf die richtige Spur. Der dazugehörige Eintrag in derselben Norm lautet *niedrigst möglicher Gezeitenwasserstand*, englisch *lowest astronomical tide*, abgekürzt *LAT*.
- Im *FIG-Fachwörterbuch* von 1999 steht die Definition, die bereits 1971 veröffentlicht wurde (BKG 1999; IfAG 1971). Diese Definition wird auch vom *GI-Lexikon* zitiert.

Einschätzung: Das Internet liefert Antworten, darunter auch richtige. Nur wer genau liest und vergleicht, kann am Ende sicher sein, die korrekte Definition zu kennen. Dahingegen sind die Nachschlagewerke (im Internet und auf Papier) überholt. Die gültige Norm liefert die korrekte Information, nur leider nicht in den richtigen Worten, sodass sich kein stimmiges Begriffssystem auftut.

Beispiel: fairsheet

In einem englischen Fachbeitrag wird beiläufig das Fachwort *fairsheet* verwendet. Aus dem Kontext geht hervor, dass es sich um eine Karte handelt. Doch die genaue Ausprägung und Funktion der Karte bleiben unklar. Der Leser interessiert sich daher für die Definition und das deutsche Äquivalent.

Internetrecherche: Die Suchmaschine liefert auf der ersten Trefferseite immerhin drei Fundstellen, die mit Hydrographie zu tun haben:

- Im *Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik* erfährt der Leser, dass *fair sheet* (mit Leerzeichen) im US-Englischen *smooth sheet* heißt und im Deutschen *Arbeitskarte*. Eine Definition fehlt (Springer 2014).
- In einem englischen Fachartikel taucht das Wort in der Überschrift auf; die Lektüre vermittelt eine Vorstellung davon, um was es sich bei einem fairsheet handelt, wirft aber keine Definition ab (Brouwer 1976).
- Außerdem gibt es einen Link zu einem Datensatz, der ein fair sheet zeigt (Harris 2015).

Literaturrecherche: Die Suche in spezialisierten Nachschlagewerken ist erfolgreicher:

- Im *Hydrographic Dictionary* steht unter dem Eintrag *fair sheet* (mit Leerzeichen) der Verweis zum Synonym *fair chart*. Dort findet sich dann eine Definition: „The final, carefully made plot of a hydrographic survey. (...) the fair chart is plotted from corrected data and represents the official permanent record of that particular survey.“ Ergänzend wird angegeben, dass man im US-Englischen *smooth sheet* sagt (IHO 1994).
- Im *FIG-Fachwörterbuch* findet sich das deutsche Äquivalent *Arbeitskarte*. Die Definition lautet: „Endgültige, sorgfältig ausgeführte Aufzeichnung einer Seevermessung. Der Maßstab der Arbeitskarte ist im Allgemeinen doppelt so groß wie der Maßstab der daraus abgeleiteten Seekarte“ (BKG 1999).
- In Normen ist das Fachwort nicht verzeichnet.

Einschätzung: Das Internet hilft nur bedingt, liefert immerhin das deutsche Äquivalent. Das *Hydrographic Dictionary*, obwohl betagt, versorgt den Leser mit der korrekten Definition, hilft aber nicht bei der Suche nach dem deutschen Äquivalent. Das *FIG-Fachwörterbuch* hilft weiter. Die Kombination aller Quellen liefert ein vollständiges Bild mitsamt allen englischen Synonymen.

Beispiel: WCI

In einem Interview ist von *WCI* die Rede. Das Gespräch liefert keinen Anhaltpunkt, wofür die drei Buchstaben stehen. Der Leser will daher herausfinden, was die Abkürzung bedeutet und wie die Vollform lautet.

Internetrecherche: Die Suchmaschinen liefern nur Ergebnisse, die in keinem Zusammenhang zur Hydrographie stehen. Auch Wikipedia kennt die Abkürzung nicht.

Literaturrecherche: Die Zeichenkette ist noch in keinem Wörterbuch und in keiner Norm verzeichnet.

Einschätzung: Bei diesem Begriff tut sich eine echte Lücke auf. Keine Quelle verrät, dass *WCI* für *water column imaging* steht, eine Technologie, die seit über einem Jahrzehnt in der Hydrographie etabliert ist. Ein Synonym ist *water column mapping*, auf Deutsch: *Wassersäulenkartierung*.

4.4 Warum sind Suchergebnisse nicht zufriedenstellend?

Kein vorhandenes Nachschlagewerk hilft in allen Situationen weiter. Dass die Suchergebnisse oft nicht zufriedenstellend sind, hat mehrere Gründe:

- Das gesuchte Fachwort ist (noch) gar nicht verzeichnet (etwa *WCI* in allen Nachschlagewerken).
- Das gesuchte Fachwort kommt nur in abweichender Schreibweise vor, sodass es – vor allem bei elektronischer Suche – nicht gefunden wird (etwa *fair sheet* statt *fairsheet* im *Hydrographic Dictionary*).
- Das Nachschlagewerk hält keine Definition bereit (etwa für *fair sheet* im *Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik*).
- Die aufgeführte Definition ist veraltet (etwa für *Seekartennull* im *Lexikon der Kartographie und Geomatik*).
- Die aufgeführte Definition steht im Widerspruch zur Definition in einem anderen Nachschlagewerk (etwa die Definitionen zu *Seekartennull* im *Lexikon der Kartographie und Geomatik* im Vergleich zur DIN 18709-3).
- Das Nachschlagewerk kennt keine Äquivalente in der gesuchten Sprache (etwa das *Hydrographic Dictionary* fürs Deutsche).

4.5 Welche Schwächen haben Wörterbücher?

Alle genannten Nachschlagewerke sind benennungsorientiert organisiert, die Fachwörter sind alphabetisch einsortiert.

In vielen Wörterbüchern ist jedes Fachwort in einem eigenen Eintrag verzeichnet. Falls ein Synonym existiert, so hat auch das einen eigenen Eintrag (Abb. 1). Zwischen den Einträgen gibt es keine Querverweise, obwohl sie sich auf denselben Begriff beziehen. So bleibt es nicht aus, dass die Definitionen voneinander abweichen.

bathymetric map. A topographic map of the ocean floor, or the bed of a lake.
A topographic chart of the bed of a body of water, or a part of it. Generally, bathymetric maps show depths by contour lines and gradient tints.

chart: bathymetric. A topographic CHART of the BED of a body of water, or a part of it. Generally, bathymetric charts show DEPTHS by CONTOUR LINES and GRADIENT TINTS.

IHO 1994

Abb. 1: Das *Hydrographic Dictionary* verzeichnet Synonyme in getrennten Einträgen.

Die benennungsorientierte Darstellung hat Schwächen. Weil vom Fachwort aus gegangen wird, gibt es zu jedem Eintrag eine Definition. Dabei wird oft übersehen, dass Fachwörter synonym sind. Aus diesem Grund lauten die Definitionen manchmal anders. Besser wäre es, vom Begriff auszugehen und anhand seiner Definition die zugehörigen Fachwörter in den verschiedenen Sprachen zu suchen (Schmitt 2016, S. 44; Arntz et al. 2014, S. 179–180).

Bei mehrsprachigen Wörterbüchern führt die Benennungsorientierung dazu, dass für jedes Fachwort ein Äquivalent in der anderen Sprache angegeben wird. Manchmal kommt es vor, dass für zwei englische Fachwörter nur ein deutsches Äquivalent gefunden wird, etwa *bathymetrische Karte* für sowohl *bathymetric map* als auch *bathymetric chart* – ein Zeichen dafür, dass es nur um einen Begriff geht.

Modernere Wörterbücher stellen die Begriffsbeziehung zwar her, bleiben aber benennungsorientiert. Sie führen in einem Eintrag mehrere Synonyme gleichrangig nebeneinander auf. Allerdings geben sie keinen Hinweis darauf, welches Fachwort in welcher Schreibweise bevorzugt werden sollte (Abb. 2).

zero of (the) chart, datum of (the) chart, datum (of charts), chart datum, hydrographic datum [*The datum used as a reference for the depths of water or heights of predicted tides*] • Kartennull n, hydrografischer Nullpunkt m, Seekarten-Null, SKN, Meer(es)karten-Null

Springer 2014

Abb. 2: Das *Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik* nennt alle Synonyme, die in korrespondierenden Einträgen mit derselben Definition wiederholt werden, ohne das bevorzugte Fachwort anzugeben.

Eine weitere Schwäche der Benennungsorientierung ist die Tatsache, dass ein Fachwort, das mehrere Bedeutungen hat (ein Homonym), mit nur einem Eintrag auskommen muss, obwohl es mehrere Begriffe bezeichnet (Abb. 3). Auch in diesem Fall erhält der Leser keine Empfehlung, für welchen Begriff das Fachwort angemessen ist, und wie er stattdessen den anderen Begriff bezeichnen soll, damit es nicht zu Missverständnissen kommt.

IHO 1994

bathymetry. The determination of ocean depths. The general configuration of SEA FLOOR as determined by profile analysis of depth data.

Abb. 3: Zwei Bedeutungen für ein Fachwort im *Hydrographic Dictionary*

In diesem Beispiel fällt der Widerspruch auf, dass sich die Bathymetrie angeblich nur mit den Meerestiefen beschäftigt, eine bathymetrische Karte hingegen die Gestalt jeglicher Gewässerböden zeigt (Abb. 1). Solche Unstimmigkeiten in den Definitionen gehen auch darauf zurück, dass nicht vom Begriff ausgegangen wurde und dass kein zusammenhängendes Begriffssystem erstellt wurde.

Das Beispiel belegt auch, wie unvollständig viele benennungsorientierte Fachwörterbücher sind. Zwar ist im *Hydrographic Dictionary* das Fachwort *Bathymetrie* verzeichnet, aber nicht in allen Bedeutungen. Dahingegen zählt die DIN 18709-3 insgesamt vier Bedeutungen auf. Zuvorderst definiert sie die Bathymetrie als „Teilgebiet der Hydrographie, das sich mit der Form und morphologischen Struktur des Meeresgrundes befasst“. Darüber hinaus erwähnt sie die Bedeutungen „Messung der Wassertiefe“, „Messergebnisse der Gewässervermessung“ sowie „Meeresgrund“ (DIN 2012). Weshalb sich die Norm auf den Meeresgrund kapriziert statt allgemeiner von Gewässergrund zu sprechen, ist nicht ersichtlich.

5 Terminologiedatenbank

Terminologen bilden den Fachwortschatz üblicherweise in einer Terminologiedatenbank ab. Eine professionelle Terminologiedatenbank (z. B. crossTerm von Across Systems) geht über ein bloßes Fachwörterbuch hinaus. Dank ihres begriffsorientierten Designs liefert sie alle Informationen zu einem Begriff auf einen Blick: die Definition, teilweise mit zusätzlicher Abbildung, sowie sämtliche Synonyme in allen verzeichneten Sprachen (Abb. 4). Und dank der Benennungsautonomie kann es zu jedem Fachwort weitere Daten geben (Drewer und Schmitz 2017, S. 129–131; Arntz et al. 2014, S. 229–243), z. B.: eine Empfehlung zur Verwendung (bevorzugt/erlaubt/verboten), Aussagen zur Häufigkeit (häufig/selten) und zur Aktualität (aktuell/veraltet) sowie einen Beispielsatz.

Abb. 4: Alles auf einen Blick: Für die ausgewählten Sprachen werden alle verzeichneten Synonyme angezeigt. Ein grünes Symbol gibt an, welches Fachwort bevorzugt verwendet werden sollte (hier: *Seekartennull* und die Abkürzung *SKN*); rot gekennzeichnete Synonyme sollten nicht verwendet werden; Fachwörter ohne Symbol (hier: *nautical chart datum*) sind erlaubt, aber eher selten.

Nutzer der online zugänglichen Terminologiedatenbank können leicht Feedback geben und Vorschläge machen. Ein Verantwortlicher prüft die Anmerkungen und bearbeitet sie inhaltlich und nach terminologischen Kriterien. Auf diese Weise werden nur qualitätsgesicherte Inhalte veröffentlicht. Die geänderten oder hinzugefügten Einträge sind ohne Verzögerung sichtbar, die Inhalte immer aktuell.

6 Terminologiearbeit

Sprachwissenschaftler haben sich bislang nicht für die Fachsprache der Hydrographie interessiert. Aber auch Hydrographen selbst haben sich mit ihrem Fachwortschatz nicht in wissenschaftlicher Weise auseinandergesetzt. Lediglich im Zuge der Erstellung der in Kap. 4.1 genannten Nachschlagewerke haben sich Hydrographen systematisch mit dem Fachwortschatz beschäftigt. Die Hydrographic Dictionary Working Group (HDWG) hat bis 1994 die Inhalte für das *Hydrographic Dictionary* zusammengetragen; ausgewiesene Experten der Hydrographie in Deutschland haben an der Neuauflage der DIN 18709-3 von 2012

mitgewirkt. In beiden Fällen wurde von den Fachwörtern aus gedacht, es wurde nicht begriffsorientiert vorgegangen.

Die IHO-Arbeitsgruppe erwägt, das *Hydrographic Dictionary* in eine neue (leider nicht streng begriffsorientierte) Datenbank zu überführen und um neue Einträge zu ergänzen (IHO 2017), ansonsten hofft sie auf Crowdsourcing (IHO 2016), also auf die unkoordinierte Hilfe einiger Freiwilliger.

Besser ist es, systematisch vorzugehen und die Methoden der Terminologielehre einzusetzen (Kap. 6.1 bis Kap. 6.5). Um den Fachwortschatz geordnet in einer Terminologiedatenbank bereitstellen zu können, müssen Fachwörter zunächst gesammelt, dann begrifflich sortiert sowie abschließend bewertet werden.

6.1 Zusammenstellen eines Textkorpus

Zur systematischen Erschließung der Fachwörter muss ein umfangreiches Textkorpus zusammengestellt werden, das als Grundlage für alle Untersuchungen dient. Dieses Textkorpus sollte sich aus Fachbüchern und Fachzeitschriften, aus Vortragsbänden und Schriftenreihen sowie aus wissenschaftlichen Publikationen zusammensetzen, aber auch z. B. aus Verfahrensanweisungen und Betriebsanleitungen für technische Geräte. Entscheidend ist, das Textkorpus so zusammenzustellen, dass es das gesamte Spektrum der Hydrographie abdeckt. Da es darum geht, den aktuellen Stand des Fachwortschatzes zu ermitteln, sollte das Textkorpus nur Fachtexte beinhalten, die nicht älter als 15 Jahre sind. Um einen Vergleich zwischen der deutschen und der englischen Fachsprache anstellen zu können, muss das Textkorpus zweigeteilt sein: ein Teil mit ausschließlich deutschen Fachtexten, ein Teil nur mit englischen.

6.2 Extrahieren von Fachwörtern

Im Textkorpus kommen nicht nur intrafachliche Fachwörter vor, die exklusiv nur von Hydrographen verwendet werden, sondern auch interfachliche Fachwörter, die sowohl Hydrographen als auch Fachleute aus benachbarten Fachdisziplinen verwenden. Darüber hinaus kommen extrafachliche Fachwörter vor, die Hydrographen verstehen müssen, um sich mit Fachleuten benachbarter Fachdisziplinen kompetent verständigen zu können, die sie aber eher selten oder gar nicht aktiv verwenden. Es werden aber auch extrafachliche Fachwörter vorkommen, die für Hydrographen nicht relevant sind. Und natürlich tauchen auch in Fachtexten jede Menge nichtfachliche Wörter auf (Roelcke 2010, S. 56).

Mit Hilfe einer computergestützten Terminologieextraktion können Fachwörter im Textkorpus identifiziert werden. Die Software schlägt sämtliche Kandidaten für mögliche Fachwörter vor – auch extrafachliche Fachwörter und nichtfachliche Wörter. Die Aufgabe besteht dann darin, aus den Kandidaten

die für Hydrographen relevanten Fachwörter manuell herauszusuchen. Hierfür müssen Kriterien entwickelt werden, um objektiv entscheiden zu können, welche Fachwörter zum Fachwortschatz der Hydrographie zählen. Am Ende lässt sich quantifizieren, wie viele Fachwörter zur Hydrographie gehören.

6.3 Zuordnen der Fachwörter zu Begriffen

Viel interessanter als die Menge der Fachwörter ist die Anzahl der Begriffe, denn die Begriffe machen das Wissen aus. Manche Begriffe werden von mehreren synonymen Fachwörtern repräsentiert, weshalb man annehmen muss, dass es weniger Begriffe als Fachwörter gibt (die Fachwörter *Fächerecholot*, *Fächerlot*, *Fächersonar* und *Multibeam* werden im Deutschen für ein und denselben Begriff bzw. Gegenstand verwendet). Ein paar wenige Fachwörter aber haben mehrere Bedeutungen im Kontext der Hydrographie, stehen also für zwei oder mehr Begriffe (ein solches Homonym ist z. B. *Bathymetrie*, Abb. 3).

In einem ersten Anlauf werden die Fachwörter den Begriffen zugeordnet. Bei dieser vorläufigen Zuordnung werden Synonyme und Homonyme erkannt. Sodann müssen die Begriffe definiert werden. Entscheidend ist, jeden Begriff sowohl inhaltlich als auch formal richtig zu definieren, und zwar so, dass seine spezifischen Merkmale genannt und seine Beziehungen zu anderen Begriffen erkennbar werden. Infrage kommen dafür vor allem Inhalts-, Bestands- und Umfangsdefinitionen (z. B. Arntz et al. 2014, S. 63–75). In diesem Stadium sind noch keine ausgefeilten Definitionen zu erwarten, die resultieren erst aus der Erarbeitung der Begriffssysteme (Kap. 6.4).

Parallel sollten die vorläufigen Definitionen mit den Angaben in vorhandenen Nachschlagewerken und Normen abgeglichen werden mit dem Ziel, das Wissen zu komplettieren und auch die Fachwörter aufzunehmen, die nicht im Textkorpus vorkommen, auch wenn sie dann wohl veraltet oder sehr selten sind.

6.4 Erarbeiten der Begriffssysteme

Auf Grundlage der vorläufig identifizierten und definierten Begriffe können zusammenhängende Begriffssysteme erstellt werden. In diesen Begriffssystemen lassen sich die Beziehungen zwischen den einzelnen Begriffen durch Verweis auf Ober-, Unter- und Nebenbegriffe darstellen. Das Ergebnis ist ein Geflecht, das nicht nur das Wissen über die einzelnen Gegenstände und Begriffe dokumentiert, sondern überhaupt erst „Denken und Erkennen“ sowie „Erkenntnis“ ermöglicht (Arntz et al. 2014, S. 39).

Die Begriffssysteme werden zunächst aus Sicht einer Sprachgemeinschaft erstellt, in der Regel aus Sicht der Muttersprache. Man kann sich z. B. fragen, wo in einem Begriffssystem ein Fächerecholot gegenüber einem Auslegersystem steht.

Auslegersysteme und Fächerecholote werden manchmal unter die *Mehrachsenschwingersysteme* subsumiert (z. B. Kranz 2011, S. 9). Synonyme dazu sind *Mehrkanal-* bzw. *Vielkanalecholot* (Springer 2014). Im Kontext eines Auslegersystems wird zuweilen auch von *Mehrstellen-Messsystem* gesprochen (z. B. Münster und Graf 2016) oder von *Flächenecholot* (z. B. Heimerl und Kohler 2015). Neben den *Mehrkanalecholoten* existieren *Einzelecholote*, auch *Einstrahlecholote* genannt (z. B. WSV 2016a), zu denen *Vertikalecholote* und *Sedimentecholote* zählen.

Auslegersysteme und Fächerecholote lassen sich aber auch als *Flächenecholote* bezeichnen, da sie beide für die flächenhafte Vermessung der Gewässerböden

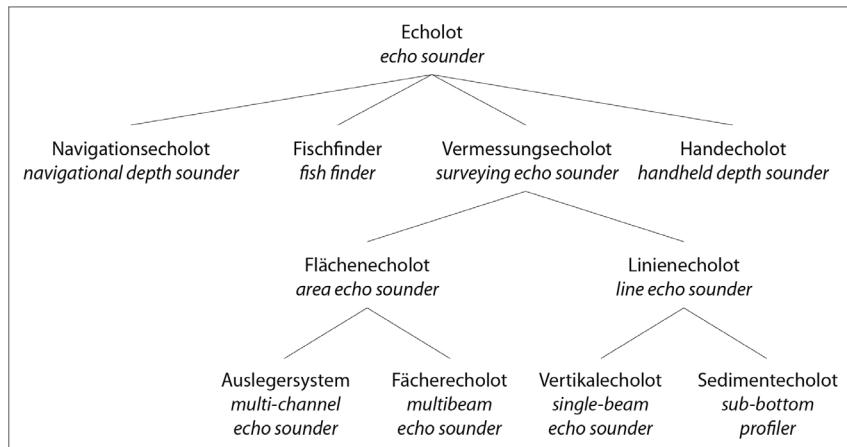


Abb. 5: Begriffssystem, aus dem die Position einzelner Begriffe hervorgeht. Die Fachwörter stehen stellvertretend für die Begriffe.

gedacht sind. Weil nach wie vor auch linienhaft vermessen wird, bietet sich die Unterscheidung zwischen *Flächenecholot* einerseits und *Linienecholot* andererseits an (letzteres Fachwort z. B. in WSV 2016b); beides sind *Vermessungecholote* (Abb. 5). *Flächen-* und *Linienecholot* bezeichnen abstrakte Begriffe, die für die Praxis kaum relevant sind. In ihnen kommt aber der Paradigmenwechsel von der profilweisen zur flächendeckenden Aufnahme zum Ausdruck.

Anschließend wird versucht, die bekannten Äquivalente in den Fremdsprachen zuzuordnen. Wo die Zuordnung nicht passt, müssen Teile der Begriffssysteme neu erstellt werden. Mit Blick auf Bestrebungen zur internationalen Normierung sollte versucht werden, die Begriffssysteme anzugleichen.

Im Englischen sehr verbreitet sind die Fachwörter *multibeam echo sounder*, abgekürzt *MBES*, und *single-beam echo sounder*, abgekürzt *SBES*. Diese Fachwörter passen gut zu den deutschen Äquivalenten *Mehrstrahlecholot* und *Einstrahlecholot*. Da sich das Fachwort *multibeam echo sounder* aber hauptsächlich

als Bezeichnung für das Fächerecholot eingebürgert hat, ist für den Oberbegriff zu Auslegersystem und Fächerecholot ein anderes Fachwort erforderlich. Eine ordentliche Struktur im Begriffssystem mit deutschen und englischen Fachwörtern ergibt sich daher durch die Differenzierung zwischen flächenhafter und linienhafter Aufnahme – statt zwischen den technischen Merkmalen „viele Strahlen versus einen Strahl“.

Sobald die Beziehungen zwischen den Begriffen klar sind, können die Definitionen abschließend ausformuliert werden. Demnach ergibt sich z. B. das Auslegersystem als „Flächenecholot, das aus mehreren nebeneinander angeordneten Vertikalecholoten, die an einem Arm befestigt sind, besteht und besonders für die Vermessung von flachen Gewässern geeignet ist“. Ein Flächenecholot wiederum lässt sich definieren als: „Vermessungsecholot, das für die flächenhafte Vermessung von Gewässern eingesetzt wird. Unterschieden wird zwischen Auslegersystem und Fächerecholot.“ In dieser Definition werden sowohl der Oberbegriff als auch die Unterbegriffe aufgezeigt sowie die Merkmale genannt.

6.5 Erarbeiten von Empfehlungen zur Verwendung

Nicht nur Begriffe sollten normiert sein, also überall auf der Welt mit annähernd gleicher Vorstellung verknüpft sein, auch die Verwendung der Fachwörter sollte im Sinne der reibungslosen Verständigung geregelt werden. Angesichts der Vielzahl der Synonyme stellt sich die Frage, welches Fachwort bevorzugt für einen Begriff verwendet werden sollte. Wer sich diese Frage beim Schreiben oder Sprechen nicht stellt, riskiert, missverstanden zu werden. Denn ein Leser oder Zuhörer, der verschiedene Fachwörter vernimmt (z. B. *Küstenmeer*, *Hoheitsgewässer* und *Territorialgewässer*), dabei nicht erkennt, dass sie synonym verwendet werden, nimmt an, dass sie unterschiedliche Bedeutungen haben. Ein ahnungsloser Übersetzer wäre bestrebt, alle Fachwörter mit jeweiligen Entsprechungen in der Fremdsprache wiederzugeben (neben den korrekten Äquivalenten *territorial waters* oder *territorial sea* z. B. das unpassende *coastal waters*). Dadurch wird die Aussage verfälscht. Doch die Ursache für die missglückte Kommunikation liegt im Ausgangstext. Wenn Fachwörter nicht kontrolliert verwendet werden, sind Missverständnisse programmiert.

Mit anderen Worten: Es sollte Empfehlungen geben, welche Fachwörter für die Fachkommunikation besonders geeignet sind – und welche Synonyme besser nicht verwendet werden sollten. Um diese Empfehlungen geben zu können, müssen verschiedene quantitative und qualitative Aspekte berücksichtigt werden. Zum einen sollten die Häufigkeit und die Aktualität untersucht werden. Je etablierter ein Fachwort, desto häufiger wird es im Textkorpus im Vergleich zu seinen Synonymen verwendet. Doch die Häufigkeit allein darf für die Empfehlung nicht ausschlaggebend sein; sie spiegelt zwar den Sprachgebrauch wider,

berücksichtigt jedoch nicht die Angemessenheit eines Fachworts. Daher müssen zum anderen auch linguistische Kriterien betrachtet werden (z.B. Dreuer und Schmitz 2017, S. 80–97). Da geht es z.B. um die Motiviertheit eines Fachworts, um die Sprechbarkeit oder darum, ob man dem Fachwort ansieht, wo in einem Begriffssystem es steht.

7 Ausblick

Sobald der Fachwortschatz der Hydrographie systematisch erschlossen und für die praktische Nutzung in einer Terminologiedatenbank bereitgestellt ist, gibt es nach langer Zeit wieder ein umfangreiches aktuelles Nachschlagewerk für Hydrographen. Damit werden zum ersten Mal die kompletten zusammenhängenden Begriffssysteme aufgezeigt. Erstmals werden auch deutsche Fachwörter verzeichnet sein. Und es wird Empfehlungen geben, welche Fachwörter für eine gelungene Fachkommunikation geeignet sind.

Der solchermaßen dokumentierte Fachwortschatz mit den abgeklärten Begriffen und Fachwörtern hilft Hydrographen, sich klarer zu verständern. Die Verwendung bevorzugter Fachwörter bringt sie dem Ideal einer normierten Fachsprache näher, was sowohl die Verständigung untereinander als auch mit Wissenschaftlern anderer Disziplinen optimiert.

Bei den Normierungsbestrebungen geht es keineswegs darum, die Fachsprachen der einzelnen Sprachgemeinschaften anzugeleichen oder gar das Englische als alleinige Wissenschaftssprache zu etablieren. Zwar verständern sich Hydrographen in internationalen Projekten zumeist auf Englisch, dennoch ist die Pflege der eigenen Fachsprache wichtig, damit es nicht zu einem Domänenverlust kommt. Ein Domänenverlust droht, wenn aufgrund von Anglizismen und Wortentlehnungen die eigene Muttersprache immer seltener für die Fachkommunikation genutzt wird (RaDT 2005). Daher sollten Hydrographen – auch Studierende –, deren Muttersprache Deutsch ist, wenigstens die Möglichkeit haben, in einer deutsch-englischen Terminologiedatenbank nachzuschlagen, in der die Fachwörter und die Definitionen auch in der eigenen Sprache stehen.

Darüber hinaus ist die Terminologiedatenbank ein Wissensspeicher, in dem das Wissen über die Gegenstände und Begriffe sowie über die sie bezeichnenden Fachwörter dokumentiert ist. Anhand von Begriffssystemen wird sichtbar, welche Verbindungen zwischen Begriffen bestehen. Nicht nur die Kenntnis über den Inhalt einzelner Begriffe macht Wissen aus, sondern vor allem die Kenntnis über die Beziehungen zwischen den Begriffen. Durch die Darstellung in Begriffssystemen wird klar, wie das Wissen der Hydrographie strukturiert ist.

Nach Abschluss der Terminologiearbeit können zudem einige Fragen beantwortet werden:

- Wie umfangreich ist der Fachwortschatz der Hydrographie, wie viele Begriffe und zugehörige Fachwörter gibt es?
- Wie hoch ist der Abstraktionsgrad der Begriffe und Fachwörter?
- Wie viele terminologische Lücken gibt es im Deutschen?
- Für welche Begriffe wird im Deutschen im tatsächlichen Sprachgebrauch eher ein englisches Fachwort verwendet, obwohl ein deutsches Fachwort zur Verfügung steht?
- Auf welche extrafachlichen Fachwörter sind Hydrographen bei ihrer Fachkommunikation angewiesen?
- Wie groß ist der Anteil an intrasprachlichen hydrographischen Fachwörtern in den Fachtexten?
- Verwenden Wissenschaftler andere Fachwörter für einen Begriff als Praktiker?
- Gibt es Beispiele dafür, dass Fachwörter der Hydrographie in die Gemeinsprache übergegangen sind, z. B. *loten/ausloten, peilen*?

Was sich zum Teil nach linguistischen Fragestellungen anhört, kann nur von Hydrographen geklärt werden, weil nur Hydrographen das nötige Fachwissen mitbringen, um die Begriffssysteme zu erarbeiten und das Wissen der Hydrographie zu strukturieren.

Literatur

- Arntz, R.; Picht, H.; Schmitz, K.-D. (2014): Einführung in die Terminologiearbeit. 7., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. Olms, Hildesheim.
- BKG (1999): FIG-Fachwörterbuch – Benennungen und Definitionen im deutschen Vermessungswesen mit englischen und französischen Äquivalenten. Band 11: Hydrographische Vermessung. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- BMVI (2014): Neues Seekartennull – Flyer, Stand: Mai 2014. www.bsh.de/de/Produkte/Infomaterial/Seekartennull/InfoLAT.pdf, letzter Zugriff 03/2018.
- Brouwer, G. K. (1976): Automated Depth Selection for the Fairsheet. International Hydrographic Review, LIII (2), 87–94. <https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/viewFile/23719/27492>, letzter Zugriff 03/2018.
- BSH (2018): Das Seekartennull in Gezeitengebieten. www.bsh.de/de/Meeresdaten/Vorhersagen/Gezeiten/811.jsp, letzter Zugriff 03/2018.
- DIN (2012): DIN 18709-3 – Begriffe, Kurzzeichen und Formelzeichen in der Geodäsie – Teil 3: Gewässervermessung. Beuth, Berlin.
- Drewer, P.; Schmitz, K.-D. (2017): Terminologiemanagement. Grundlagen – Methoden – Werkzeuge. Springer Vieweg, Berlin.
- Harris, U. (2015): Casey RAN Fair Sheet Data from HI 161 V5/500 6610/1 scale 1:10 000. Australian Antarctic Data Centre. https://researchdata.ands.org.au/casey-ran-fair-110-000/687310?source=suggested_datasets, letzter Zugriff 03/2018.

- Heimerl, S.; Kohler, B. (2015): Einsatz eines Sedimentecholots für eine Bathymetrie einschließlich Sedimentkartierung. 38. Dresdner Wasserbaukolloquium 2015 „Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer“.
- IfAG (1971): FIG-Wörterbuch – Benennungen und Definitionen im deutschen Vermessungswesen. Heft 11 – Seevermessung – Manuskriptdruck. Verlag des Instituts für Angewandte Geodäsie, Frankfurt am Main.
- IHO (1994): S-32 – IHO Hydrographic Dictionary (Special Publication No. 32, Part 1, Volume 1, English, Fifth edition). IHB – International Hydrographic Bureau, Monaco.
- IHO (2007): S-32 – Hydrographic Dictionary, Glossary of ECDIS Related Terms (Special Publication No. 32, Volume 1, Appendix 1, English). IHB – International Hydrographic Bureau, Monaco.
- IHO (2016): Proposal by the Hydrographic Dictionary Working Group on a new strategy and HD format. IHO-Dokument „HDWG1 – 02“, HSSC 8, Monaco, 16.11.2016.
- IHO (2017): Hydrographic Dictionary Working Group Meeting London (25–26 July 2017) – Proposals for a New Structure and Database Application. IHO-Dokument „HDWG1 – 03_corr1“.
- Kranz, S. (2011): Möglichkeiten zur Nutzung von Bewegungssensoren in kleinen Vermessungsbooten. Bachelorarbeit an der Hochschule Neubrandenburg, 68 S.
- Münster und Graf (2016): Peilboot Magda – Mehrstellen-Messsystem für Flachwasser- aufnahmen. Imagebroschüre.
- RadT (2005): Domänenverlust im Deutschen – Stirbt Deutsch als Fachsprache? – Ein Thesenpapier des RaDT. RaDT – Rat für Deutschsprachige Terminologie, Bern.
- Roelcke, T. (2010): Fachsprachen. 3., neu bearbeitete Aufl. Erich Schmid Verlag, Berlin.
- Schmitt, P. A. (2016): Terminologie und Fachlexikografie. In: Hennig, J.; Tjarks-Sobhani, M. (Hrsg.) (2016): Terminologiekartei für Technische Dokumentation. 2., grundlegend überarbeitete Auflage. tcworld, Stuttgart, 31–49.
- Spektrum (2001): Lexikon der Kartographie und Geomatik. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Springer (2014): Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Uni Rostock (2001–2016): GI-Lexikon. Universität Rostock. www.geoinformatik.uni-rostock.de/lexikon.asp.
- Wikipedia (2018): Seekartennull. <https://de.wikipedia.org/wiki/Seekartennull>, letzter Zugriff 03/2018.
- WSV (2016a): Seevermessung. Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Tönning, Stand: 15.06.2016. www.wsv.de/wsa-toe/wasserstrassen/seevermessung/index.html, letzter Zugriff 04/2018.
- WSV (2016b): Wassertiefe und Gewässervermessung. Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Stralsund, Stand: 06.06.2016. www.wsv.de/wsa-hst/Schiff-WaStr/Wasserstrasse/Wassertiefe_und_Gewaesservermessung/index.html, letzter Zugriff 04/2018.

Kontakt

Lars Schiller

ZINDEL AG – Technische Dokumentation und Multimedia

Tangstedter Landstraße 83, 22415 Hamburg

lars.schiller@zindel.de | lars.schiller@dhyg.de

Session 2: Anwendungen im Binnenbereich

Tiefenschärfe – luft- und wassergestützte Vermessung des Bodensees und einige Folgeprojekte

Martin Wessels | Nils Brückner | Pushpa Dissanayake |
Hilmar Hofmann | Paul Wintersteller

1 Einleitung

Am Bodensee hat sich seit dem späten 19. Jahrhundert eine langjährige Tradition zur Erforschung des Gewässers etabliert. Schon 1886 erkannte eine „Internationale Kommission“ die Wichtigkeit guter kartographischer Grundlagen für das Verständnis eines Gewässers wie dem Bodensee. Aus diesem Grund wurde 1893 eine nach dem damaligen Stand der Technik detaillierte bathymetrische Karte des Bodensees mit über 11.000 Handlotungen veröffentlicht, welche die Grundlage für viele wissenschaftliche Arbeiten in der damals entstehenden Limnologie wurde (Hörnlimann 1893, Zeppelin 1893).

Die zunehmende anthropogene Belastung (vor allem die Eutrophierung und der Nutzungsdruck auf die Seeufer) des Sees führte zur festen Etablierung eines grenzüberschreitenden und multidisziplinären Gewässerschutzes im Jahre 1959. Fast einhundert Jahre nach der Zeppelin-Karte wurde deshalb zwischen 1986 und 1990 eine neue Vermessung des Bodensees mit Echolot und einer flächen-deckenden Vermessung der Flachwasserzone mit photogrammetrischen Methoden durchgeführt, um eine Basis für das weitere Verständnis und die Erforschung des Gewässers zu entwickeln (Braun und Schärfp 1994). Schon wenig später zeigte sich das enorme Potenzial der rasanten Entwicklung der Vermessungstechnik: Präzise Satellitennavigation und mobile, auf kleinen Schiffen einsetzbare Fächerecholote für größere Wassertiefen und später auch das airborne Laserscanning (Mandlburger et al. 2009) für die transparenten Flachwasserbe-reiche, sind für die Erforschung der Gewässer nutzbar. Sie bieten die Möglich-keit, mit hochauflösenden Geländemodellen im sub-Meter-Bereich ein völlig neues Verständnis für die Seebodenstrukturen und die Dynamik der Flachwas-serzone zu gewinnen. Die IGKB ließ darum mit Unterstützung aus EU-INTER-REG-Mitteln den Bodensee mit einer Kombination von Multibeam und LiDAR zwischen 2012 und 2015 im Rahmen des Projekts „Tiefenschärfe hochauflösen-de Vermessung Bodensee“ neu vermessen. Technische Details und einige erste Anwendungen der Daten sind an anderer Stelle veröffentlicht (IGKB 2016).

In diesem Beitrag möchten wir die Verwendung der Daten in aktuellen Arbeiten herausstellen, um die vielfältige Nutzbarkeit moderner hydrographischer Daten und Methoden zu zeigen.

2 Methoden im Projekt Tiefenschärfe

Das Tiefenschärfe-Projekt wurde zwischen 2012 und 2015 durchgeführt. Die Projektkoordination lag beim Institut für Seenforschung der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Baden-Württemberg und wurde von den Vermessungsverwaltungen aus Baden-Württemberg, Bayern, Österreich und der Schweiz begleitet. Die eigentlichen Vermessungen wurden von der Universität Bern (Fächerecholot) und der Firma Airborne Hydromapping (AHM, topobathymetrisches Laserscanning) durchgeführt. Für das Projekt einigte man sich im Vorfeld auf eine Datenerhebung im ETRS89 Bezugssystem und ellipsoidische Höhen. Die externe Qualitätskontrolle des Projektes erfolgte durch die Universität Bremen und gewährleistete die hohe Qualität und Konsistenz des Datensatzes. Die verwendeten Methoden und das Prozessieren der Daten sind ausführlich in einem Bericht der IGKB zusammengefasst (IGKB 2016).

2.1 Vermessung mit dem Fächerecholot

Im Jahr 2013 wurden in Wassertiefen über 5 m insgesamt ca. 5600 km Vermessungslinien mit dem Forschungsschiff Kormoran zurückgelegt. Die Aufnahme erfolgte mit KONGSBERG EM2040 Single-Head Fächerecholot (Multibeam Echosounder (MBES)), zum Teil unter Verwendung von zwei Steuer- bzw. Prozessierungseinheiten in tiefem Wasser, um in Fahrtrichtung eine doppelte Datendichte (Dual Swath) zu erreichen. Der Profilabstand wurde so gewählt, das benachbarte Profile sich jeweils zu etwas mehr als der Hälfte überdeckten, so das eine durchschnittliche Fächerüberdeckung von etwa 110 %, resultiert. Der maximale Öffnungswinkel des Fächers betrug 125° bzw. maximal 400 m. Sämtliche Profile in dem 250 m tiefen See wurden mit 300 kHz gefahren und es wurden die von der IHO S-44 (IHO 2008) geforderten Punktdichten eingehalten bzw. in flachem Wasser bei weitem übertroffen. Da die Aufnahme aus logistischen Gründen nicht im Spätwinter bei annähernder Homothermie erfolgen konnte, wurden zwischen April und August 2013 insgesamt 592 Schallprofile angefertigt (IGKB 2016). Im Frühjahr 2014 wurden einige bei der Aufnahme 2013 verbliebene Lücken gefüllt.

2.2 Aufnahmen mit dem topobathymetrischen Laserscanner

Ende März 2014 wurde der Großteil der Uferlinie an zwei Tagen mit einem topobathymetrischen Laserscanner (Riegl-VQ820 G) beflogen. Kleinere Teilgebiete wurden an drei späteren Flugtagen beflogen bzw. ergänzt, sodass auf den insgesamt 273 km Uferlinie etwa 300 km² Fläche aufgenommen wurden. Mit dem System konnten in 4 bis 5 m Wassertiefe Punktdichten von bis zu 10 bis 20 Punkte/m² erzielt werden (IGKB 2016). Die maximale Eindringtiefe des Lasers in das Wasser betrug etwa 11 m, in kleinen Gebieten mit dunklem Seeboden auch unter 5 m, sodass es kleinere Lücken im Anschluss an die Echolotdaten gab. Die Datenpunkte wurden in Boden, Gewässerboden, Gebäude und Baustrukturen im Gewässer sowie mehrere Vegetationsklassen klassifiziert.

2.3 Qualitätskontrolle der Daten und Herstellung eines digitalen Geländemodells

Im Rahmen der Qualitätskontrolle wurde das Projekt von der Ausschreibung bis zur Durchführung und Datenauswertung begleitet. Parallel zu dem Fächerlot wurde für die Qualitätskontrolle ein sediment-profilierendes Echolot (Innomar SES-2000 Light) betrieben (IGKB 2016).

2015 wurden die Datensätze der Aufnahmen mit dem Fächerecholot und dem bathymetrischen Laserscanner vereinigt und ein digitales Geländemodell (DGM) hergestellt. Vereinzelte Lücken zwischen den LiDAR-Daten und dem Echolotdatensatz wurden interpoliert. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, Datenpunkte mit Bauwerken der Trinkwasserentnahmen und Schiffswracks aus den Datensätzen zu entnehmen, um den Belangen des Denkmalschutzes und der Wasserversorger gerecht zu werden.

Aus den ca. 12 Mrd. Datenpunkten des Laserscanning und den über 7 Mrd. Datenpunkten des Fächerlotes wurden Geländemodelle mit 3 m und 10 m Auflösung gerechnet und mit einer vorläufigen Version des Quasigeoids 2016 der BKG in Gebrauchshöhen (DHDN) umgerechnet.

Aus den LiDAR-Daten wurden zudem DGM und digitale Oberflächenmodelle (DOM) in 1 × 1 km großen Kacheln mit einer Auflösung von 0,5 m hergestellt. Diese Daten wurden mit ellipsoidischen Höhen übergeben, um von den jeweiligen Vermessungsverwaltungen in die eigenen Höhensysteme zu überführen. Sämtliche Daten wurden im Sommer 2016 den jeweiligen Vermessungsverwaltungen zur Verfügung gestellt.

3 Nutzung hochauflösender bathymetrischer Daten in Folgeprojekten

Schon vor Abschluss des Projektes gab es eine ganze Reihe von wissenschaftlichen und wasserwirtschaftlichen Fragestellungen zur direkten und indirekten Nutzung der Daten aus dem Tiefenschärfe-Projekt. Hier sollen nur wenige Beispiele gezeigt werden.

3.1 Hydrodynamik und Morphodynamik in der Flachwasserzone

Im ReWaM-Verbundprojekt „HyMoBioStrategie“ werden im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland (ReWaM)“ unter anderem die Hydro- und Morphodynamik in der Flachwasserzone von Seen am Beispiel des Bodensees untersucht. Die Sedimentdynamik wird wesentlich durch die Eigenschaften des Oberflächenwellen- und Strömungsfelds, die Morphometrie und durch Wasserspiegelschwankungen beeinflusst und mit verschiedenen Messmethoden und Modellansätzen bestimmt.

Besonders die numerischen Modelle benötigen hochauflöste Eingangsdaten. Mittlerweile sind in großen Seen wie dem Bodensee lokal Gitterweiten von 5 m für zeitlich hochauflösende dreidimensionale hydrodynamische Modelle rechenbar. Auf der anderen Seite zeigen In-Situ Messungen mit akustischen „Erosionsmarkern“ (s. u.), wie hoch die natürliche bzw. anthropogen überprägte Dynamik von Erosion und Akkumulation und damit die zeitliche Gültigkeit von hochauflösenden Geländemodellen ist.

Messung von Sedimenthöhenänderungen

Mit hochgenauen, akustischen Erosionsmarkern wurde an verschiedenen Messstellen die zeitliche Dynamik der Sedimenthöhe als Maß für die Erosion und Akkumulation gemessen (1 mm vertikale Genauigkeit, 10 s Messintervall). Im Untersuchungsgebiet Kressbronn am nördlichen Bodensee-Ufer wurde in 13 Monaten ein mittlerer Sedimentabtrag von rund 15 mm gemessen (Abb. 1a). Kurze Zeiträume (während Starkwindereignissen) zeigten eine hohe zeitliche Dynamik von ± 20 bis 60 mm (Abb. 1a). In der Untersuchungsperiode zeigte sich zudem ein saisonales Muster (Abb. 1a): Akkumulation im Frühjahr und Frühsommer, relativ wenig Veränderung bis in den September und Erosion im Herbst und Winter bei niedrigen Wasserständen. Dieses Muster verdeutlicht den großen Einfluss der saisonalen Wasserspiegelschwankungen und des Makrophytenbewuchses im Zusammenspiel mit Starkwindereignissen auf die Sedimentdynamik in der Flachwasserzone von Seen. Im Sommer bei hohem Wasserstand,

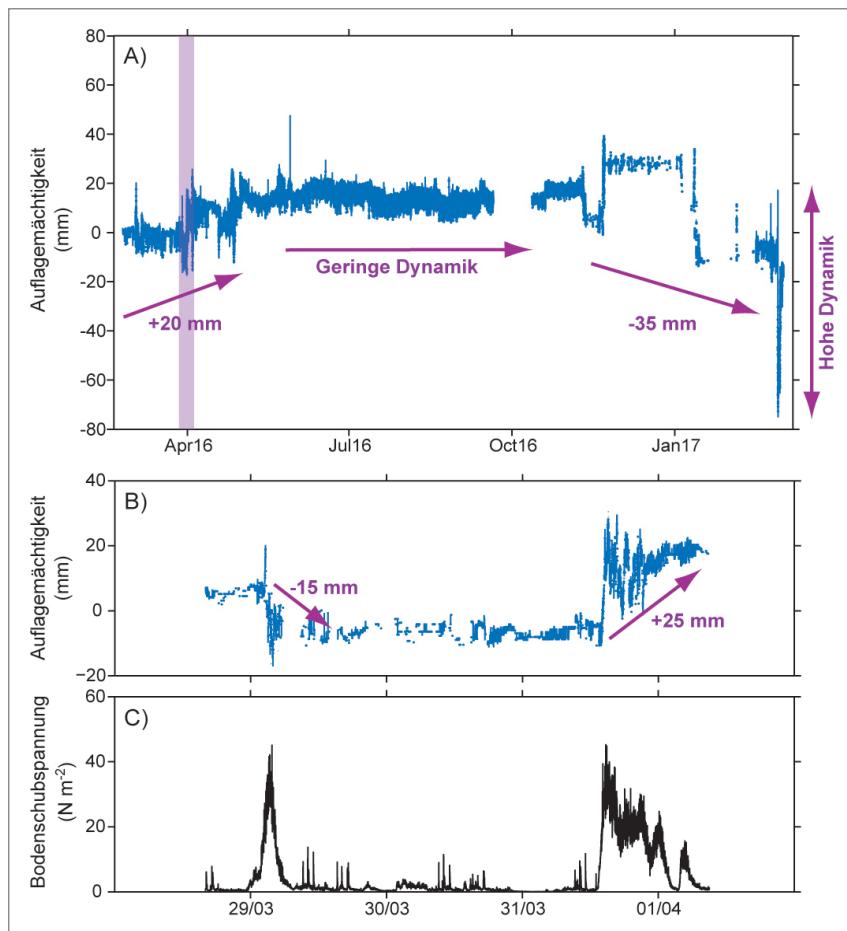


Abb. 1: Zeitlich hochauflöste Messung von Sedimenthöhenänderungen in der Flachwasserzone des Bodensees, Kressbronner Bucht, zwischen Februar 2016 und März 2017 (A). In B) und C) erkennt man zeitlich aufgelöste Änderungen der Sedimenthöhen und der welleninduzierten Bodenschubspannung während zweier Starkwindereignisse zwischen dem 28.3. und 1.4.2016 (magentafarbener Balken in A).

wenn der gesamte Boden mit Makrophyten bewachsen ist, können Windereignisse kaum Oberflächensedimente mobilisieren. Bei fallendem Wasserstand und sukzessive absterbenden Makrophyten nimmt die Sedimentdynamik wieder zu und die Sedimentoberfläche erodiert (im Beispieljahr ca. 35 mm, **Abb. 1a**).

Schon einzelne Starkwindereignisse können zu einer Nettoänderung der Sedimenthöhe von 10 bis 30 mm führen. Kurz aufeinanderfolgende Starkwind-

ereignisse gleicher Magnitude (Bodenschubspannung, [Abb. 1b und 1c](#)) können deshalb lokal sowohl zu deutlicher Erosion als auch zur Akkumulation von Sedimenten führen.

Diese enorme Sedimentdynamik muss bei der Interpretation sehr hochauflösender Geländemodelle und vor allem der Daten des topobathymetrischen Laserscannings berücksichtigt werden.

Sedimenttransportmodellierung

Im ReWaM-Verbundprojekt HyMoBioStrategie wurde neben der Messung von Sedimenthöhenänderungen ein gekoppeltes, numerisches Modell mit einer horizontalen Auflösung zwischen 8 und 500 m entwickelt, das die Daten aus

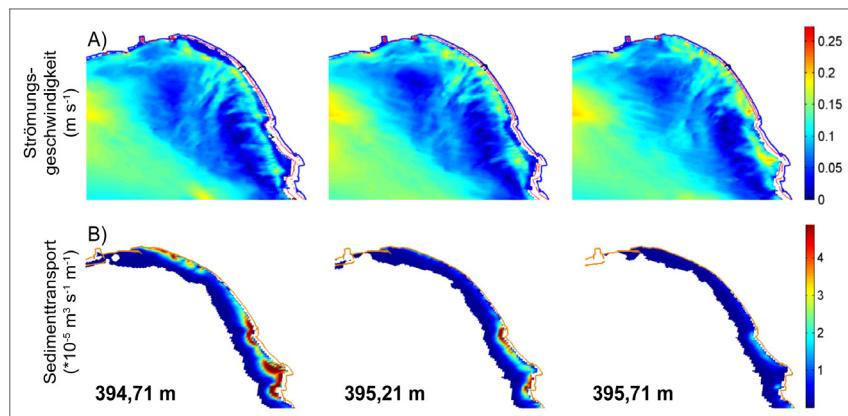


Abb. 2: Numerische Modellierung des Strömungsfelds (A) und des Sedimenttransports (B) in der Kressbronner Bucht für unterschiedliche Wasserspiegellagen (394,71 m, 395,21 m und 395,71 m ü. NN). Das horizontal aufgelöste Strömungsfeld zeigt die oberflächennahe Strömung in 1 m Wassertiefe. Die drei Szenarien wurden mit konstantem Wind aus Südwest mit 12 m s^{-1} modelliert.

dem Tiefenschärfe-Projekt nutzt. Dieses Modell kann die Dynamik des Wellen- und Strömungsfelds und des Sedimenttransports abbilden und überwindet die räumliche und zeitliche Begrenzung empirischer Messungen. So konnte für die Kressbronner Bucht unter anderem der Einfluss unterschiedlicher Wasserstände auf das Strömungsfeld sowie den Sedimenttransport gezeigt werden ([Abb. 2](#)).

Der Sedimenttransport in der Flachwasserzone findet vor allem uferparallel statt. Die größten Magnituden treten während Starkwindereignissen vor allem bei niedrigen Wasserständen bis $\sim 3 \text{ m}$ Wassertiefe auf. Die Muster der Sedimentverteilung resultieren aus der spezifischen Exposition der Ufer, der Inter-

aktion zwischen der Richtung des Wellen- und Strömungsfeldes und der sich lokal ändernden Morphologie.

Drei Modellszenarien mit unterschiedlichen Wasserspiegellagen (394,71 m; 395,21 m; 395,71 m) bei Wind aus Südwest mit 12 m s^{-1} in der Kressbronner Bucht zeigen, dass besonders bei niedrigem Wasserstand die Bodenschubspannung größer wird und die Menge in Suspension gehaltener Sedimentpartikel, die mit der Hintergrundströmung transportiert werden, ansteigt.

3.2 Seebodenstrukturen und Massenbewegungen

Die hochauflösenden topobathymetrischen Daten wurden in einer Masterarbeit auf Spuren von Massenbewegungen hin untersucht (Brückner 2016). Dabei stellte sich heraus, dass der Seeboden in vielen Gebieten stark von Rutschungsereignissen geprägt ist. Besonders im nordwestlichen Überlinger See hat sich ein System von kleinen Rutschungskanälen gebildet, im Rheindelta des Obersees zeigt eine Canyonlandschaft das erosive Potenzial des Rheins vor der Regulierung des Alpenrheins.

Bei dem Vergleich der gefundenen Massenbewegungen mit den lokalen/regionalen geologischen Einheiten konnte ein räumlicher Zusammenhang zwischen kraterartig aussehenden Abbruchkanten und wasser durchlässigen Schichten der Molasse festgestellt werden. Diese Rutschungsstrukturen lassen sich im östlichen Überlingersee (siehe Abb. 3) und südwestlich von Lindau im Obersee finden. Vermutlich ist ein geringer Grundwasserzustrom für lokale Instabilitäten

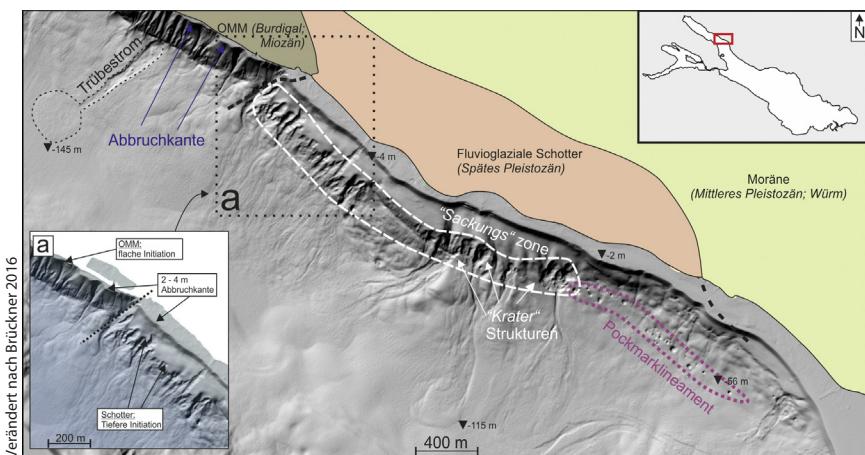


Abb. 3: Kraterartige Rutschungsstrukturen im Überlinger See und ihre Fortsetzung mit Pockmarks. Die Abbruchkanten weisen verschiedene Tiefen aus, die eventuell mit lokalen, geologischen Einheiten zusammenhängen.

verantwortlich. Das Lineament der Kraterstrukturen wird durch Pockmarks weitergeführt, (siehe Abb. 3).

Es ist etwas spekulativ, aber möglicherweise wird ein Wasserzutritt durch die nach Osten in Richtung Flussmündung zunehmende Sedimentauflast beeinträchtigt, sodass geringe Wasserzutritte nur noch zur Bildung von Pockmarks und nicht von Rutschungseignissen ausreichen. Ein weiterer Grund für die Entstehung von Pockmarks ist die Nähe zu den hohen Einträgen von organischem Material an Flussmündungen (Wessels et al. 2010; siehe auch Kap. 3.4). Es dürfte ein Mechanismus existieren, bei dem eine Kombination aus Gas, Grundwasserzutritten und lokaler Sedimentbedeckung zu Hanginstabilitäten führt.

3.3 „Stonehenge“ im Bodensee

Während der Messungen mit dem Fächerlot zeigten sich entlang des Schweizer Seeufers regelmäßige kreisrunde Erhebungen (Abb. 4). Über eine Strecke von ca. 10 km befinden sich in Wassertiefen von 5 bis 7 m regelmäßige, runde Strukturen von 1 bis 2 m Höhe und bis zu 30 m Durchmesser. Untersuchungen mit einem niederfrequenten boomer (3,5 kHz, unveröffentlichte Daten der Universität Bern und ISF) zeigten, dass diese Strukturen nicht mit dem tieferen Untergrund (Molasse bzw. glaziale Ablagerungen) in Verbindung stehen.

Die Vermutung lag nahe, dass es sich bei diesen Hügeln um anthropogene Strukturen handelt, weshalb von den Medien die Schlagzeile „Stonehenge im Bodensee“ kreiert wurde. Taucher konnten im Auftrag der thurgauischen Kantonsarchäologie klären, dass es sich bei diesen „Hügeli“ um Steine mit Durchmessern zwischen 10 und 40 cm Durchmesser handelt und es sich um typische

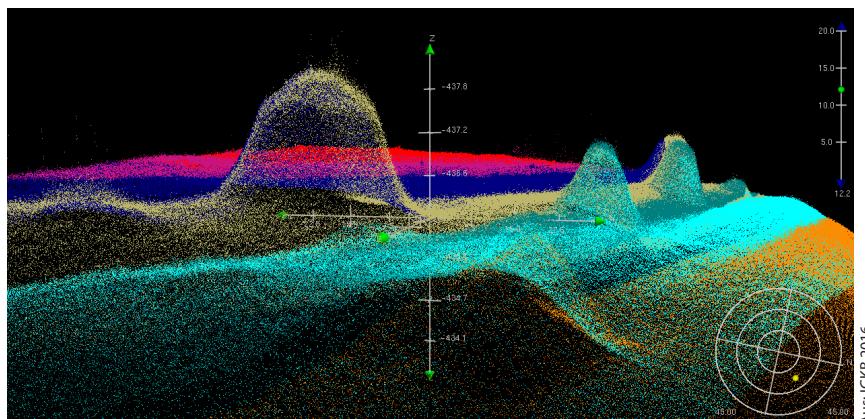


Abb. 4: Punktfolke der Hügelstrukturen am Thurgauer Seeufer. Die Daten einzelner Profile mit dem Fächerlot und dem Laserscanner sind unterschiedlich eingefärbt.

Geschiebe der letzten Vereisung handelt. Einige lose Hölzer wurden dendrochronologisch datiert, zeigten aber sehr widersprüchliche Alter. Die Entstehung dieser mutmaßlich anthropogenen Strukturen liegt deshalb bislang völlig im Dunkeln, zumal bislang auch keinerlei schriftliche Hinweise zu ihrer Entstehung gefunden wurden. Im Mai 2018 sollen sie weiter untersucht werden.

3.4 Hydroakustische Aufnahmen der Wassersäule und Methan-Emissionen im Bodensee

Die zusammen mit der Bathymetrie aufgezeichneten enorm speicherintensiven Daten der Wassersäule wurden in einer achtmonatigen Analyse auf Methan-Entgasungen untersucht. Dabei konnten wir ca. 19.000 so genannte „Flares“ in der Wassersäule und etwa 2600 „Pockmarks“ erfassen. Pockmarks sind runde Vertiefungen im Seeboden, die in der Regel mit Methan-Entgasungen bzw. Fluid-Austritten in Zusammenhang gebracht werden (Wessels et al. 2010). Während sich Pockmarks weit verteilt im Obersee und Überlingersee bis in ca. 150 m Wassertiefe zeigen, finden sich aktive Gasflares hauptsächlich im östlichen Teil des Obersees und lediglich in geringem Umfang im Überlingersee und Untersee (Abb. 5).

Neben den Fächerecholot-Daten geben die Sediment-Echolotprofile weitere Hinweise darauf, dass entweder unterschiedliche Prozesse oder unterschiedliche zeitliche Dynamiken für das Entstehen der Pockmarks verantwortlich sind. Da nur ein Teil der während des Aufzeichnungszeitraumes gefunden Entgasungen an aktive Pockmarks geknüpft ist, sind hier sicher verschiedene Prozesse zu unterscheiden.

3.5 Bereitstellung der Daten und Nutzung von klassifizierten LiDAR-Daten

Neben wissenschaftlichen Fragestellungen konnten die Daten für eine ganze Reihe kleinerer und größerer technischer Projekte (Verlegen von Kabeln, Planung von Horizontalbohrungen, Bau von Wasserentnahmen, ...) genutzt werden. Das erfolgte in der Regel über die Bereitstellung fertiger Geländemodelle bzw. einzelner Profilschnitte durch das Institut für Seenforschung. Die 3 m und 10 m DGM werden im Pangaea-System, einer *open access library* am Alfred Wegener Institut Bremerhaven gehostet und für die Öffentlichkeit bereitgestellt (DOI: [10.1594/PANGAEA.855987](https://doi.org/10.1594/PANGAEA.855987)).

In Baden-Württemberg werden Geodaten, wie wohl in den meisten Bundesländern, zentral vorgehalten und den Nutzern in jährlichem Turnus bereitgestellt. Bislang stehen im baden-württembergischen „Räumlichen Informations- und Planungssystem (RIPS)“ lediglich die Geotiff-Dateien mit 3 m und 10 m

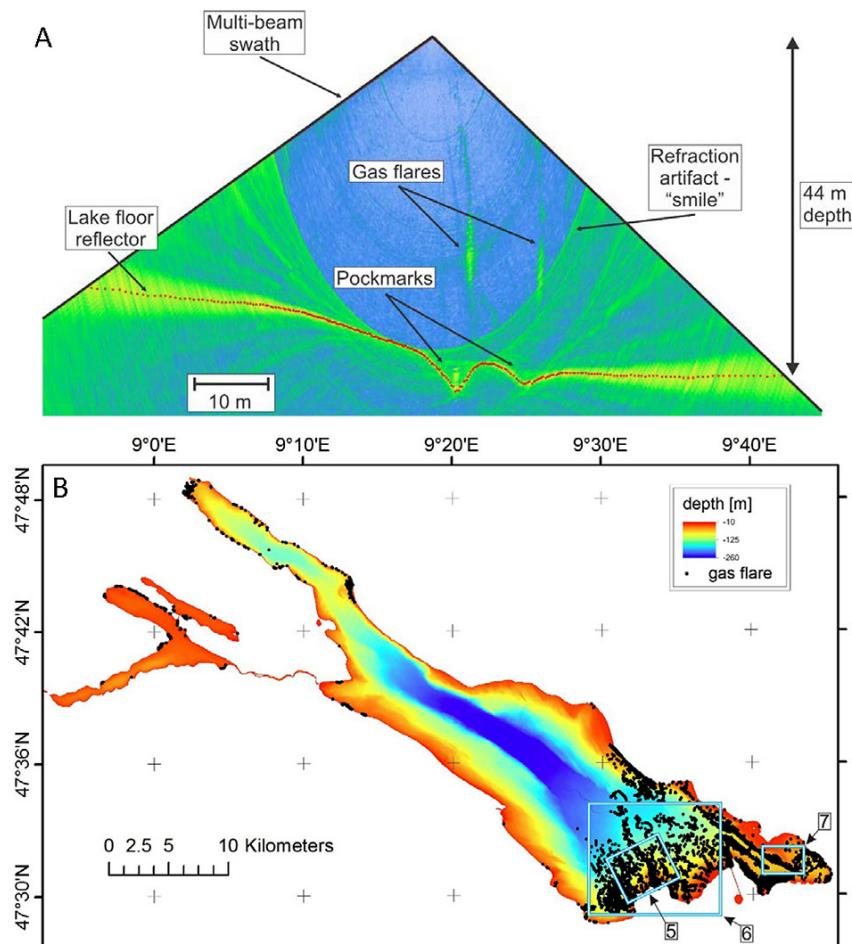


Abb. 5: Gasflares (A) können in den Wassersäulendaten z.B. über Pockmarks identifiziert werden und treten vor allem im östlichen Bodensee-Obersee auf (B).

Rasterweite zur Verfügung, die für Planungsbüros oder Gutachten nur eingeschränkt nutzbar sind.

Neben der Nutzung für ein DGM des gesamten Sees wurden die topobathymetrischen LiDAR-Daten in sieben Klassen (Boden, Gewässerboden, Gebäude und Baustrukturen im Gewässer sowie mehrere Vegetationsklassen) automatisch und händisch klassifiziert. Es wurden Geländemodelle mit 0,5 m Auflösung gerechnet, unter anderem, um die Daten für Uferplanungen zu nutzen zu können. Diese Daten sind eher für die behördliche Nutzung vorgesehen, um

z. B. die Dimensionierung von Steganlagen, Standorte einzelner Dalben oder die Ausdehnung von Schilfbiotopen zu dokumentieren. Entsprechende Anfragen nach diesen Daten gab es bislang nicht, wobei sicherlich problematisch ist, dass die zuständigen Fachleute (zum Beispiel in den Wasserwirtschaftsverwaltungen oder dem Naturschutz bei den Landratsämtern) häufig nur über eingeschränkte GIS-Werkzeuge verfügen. Zudem erfordert das Visualisieren und Arbeiten mit LiDAR-Punktklassen in laz-Dateien ein Spezialwissen, dass in der Regel bei den unteren Verwaltungsbehörden nicht vorhanden ist.

Im Alltag zeigt sich zudem, dass einige Anwender mit der Nutzung der DGM-Datensätze überfordert sind, obwohl die DGM als fertige ESRI-Ascii-grids in 1×1 km großen Zellen bereitgestellt wurden. Die in einigen Planungsbüros eingesetzte Software ist teilweise nicht geeignet, um hochauflösende Geländemodelle mit eigenen Planungen zu kombinieren.

Da im November 2016 vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie das neue Quasigeoid offiziell bereitgestellt wurde, werden derzeit die LiDAR-DGM- und DOM-Modelle von ellipsoidischen Höhen in das DHHN 2016 transformiert, sodass auch diese Daten hoffentlich einfacher genutzt werden können.

3.6 Datenlücken und Repräsentativität der Bodensee-Vermessung

Für die Geländemodelle in 3 m Auflösung und vor allem mit einem annähernd lückenlosen Datensatz von 250 m Wassertiefe bis ans Ufer konnten zwei hochauflösende Techniken gut kombiniert werden. Vorhandene Lücken zwischen den Datensätzen wurden interpoliert, vor allem in Bereichen, in denen der topobathymetrische Laserscanner die reflektierten Signale nicht für eine Bodenerkennung ausreichten, etwa Häfen und einzelne Buchten.

Aufnahmen mit einem Remotely Operated Vehicle (ROV), einem tief geschleppten Sidescan-Sonar oder einem Horizontalsonar zeigen, dass der Seeboden tatsächlich deutlich kleinräumiger strukturiert ist (Abb. 6a), was auch von einem 1 m DGM nicht abgebildet werden kann. Zudem werden auch einige größere (flache) Strukturen von den DGM nicht abgebildet: Gerade in der Nähe der Rheinmündung gibt es Flowmarks von bodennahen Einstromereignissen des Alpenrheins, die zum Teil erosiv auf den Seeboden einwirken und charakteristische Strukturen erzeugen (Abb. 6b und 6c). Diese schmalen, zum Teil aber auch flächenhaften großen Strukturen (etwa 0,3 m tief nach Schattenlänge auf dem Sidescan-Sonar) lassen sich mit den Fächerecholotdaten bzw. den daraus hergestellten Geländemodellen nicht abbilden (Abb. 6d). Für die Untersuchung solcher Fragestellungen sind sicher tiefgeschleppte bzw. dicht über dem Seeboden fahrende autonome Systeme die Wahl, wobei es zumindest aus wasserwirtschaftlicher Sicht kaum Sinn macht, den gesamten See mit solchen Systemen zu kartieren.

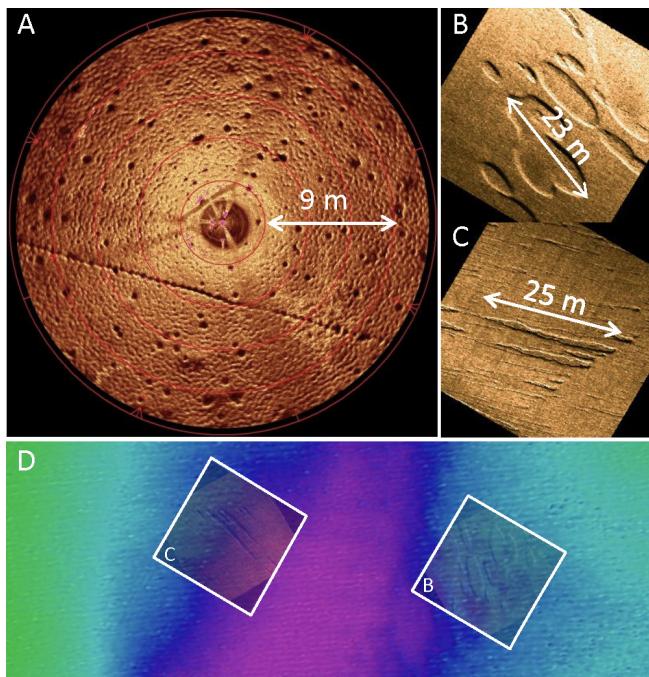


Abb. 6:

Mit einem Horizontalsonar (MS1000) abgebildete „mini“-Pockmarks (A) und von einem tief geschleppten Sidescan-Sonar (Klein 3000) erfasste größere Strömungsmarken vor dem Rheindelta (B, C) werden vom Fächerecholot bzw. dem resultierenden DGM nicht abgebildet (D).

4 Ausblick

Die Vermessung des Bodensees im Jahr 1893 wurde im Auftrag der „Internationalen Comission der fünf Bodensee-Uferstaaten“ durchgeführt und war ein Startschuss für die intensive Erforschung des Bodensee (Zeppelin 1893). Heute gilt der Bodensee als eines der weltweit am intensivsten erforschten Gewässer in dem mit einem modernen, wegweisenden Gewässerschutz enorm viel für die nachhaltige Nutzung des größten Trinkwasserspeichers in Europa erreicht wurde.

Das aktuelle Projekt „Tiefenschärfe“ und die kleine Auswahl von Folgeprojekten in diesem Beitrag zeigen, dass moderne Vermessungsmethoden auch in diesem außerordentlich gut untersuchten System sehr viel zu einem besseren Verständnis des Gewässers beitragen können. Dazu trägt nicht zuletzt eine intensive Nutzung der Daten zu Ausbildungszwecken an den Hochschulen bei. Hier werden die Daten, neben „klassischen“ Themen wie der Analyse von Seebodenstrukturen oder der Verwendung für hochauflösende numerische Modelle, auch genutzt, um z. B. angehende Bauingenieure an die Nutzung von großen Punktwolken heranzuführen. Das ist nicht zuletzt die Folge einer weitgehend freien Verfügbarkeit der Daten.

Dank

Das Tiefenschärfe-Projekt wurde mit INTERREG-Mitteln der Europäischen Union und der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB), vertreten durch Schweizerische Eidgenossenschaft, den Österreichischen Staat und den deutschen Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg gefördert.

Das ReWaM-Verbundprojekt HyMoBioStrategie (Förderkennzeichen: 033W021) wurde im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland (ReWaM)“ gefördert.

Viele Behörden, Projektpartner und Auftragnehmer haben mit Daten und Expertise ein gutes Gelingen der Projekte ermöglicht – sie alle aufzuzählen, würde den Rahmen sprengen.

Literatur

- Braun, E.; Schärfp, K. (1994): Internationale Bodensee-Tiefenvermessung 1990. Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (ed.), Stuttgart, 1–98.
- Brückner, N. (2016): Mass Transport Deposits within Lake Constance, Central Europe – GIS-based Analysis of High-Resolution Hydroacoustic Data. Master thesis at the Department of Geosciences, University of Bremen.
- Hornlimann, J. (1893): Die Tiefenmessungen und das Kartenmaterial für die Herstellung der neuen Bodensee-Karte. Schrr. Ver. Gesch. Bodensee, 22, 50–57.
- IGKB (2016): Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee: Tiefenschärfe – Hochauflösende Vermessung Bodensee. IGKB, Blaue Reihe, Bericht Nr. 61.
- IHO (2008): International Hydrographic Organization – Standards for Hydrographic Surveys (S44, 5th edition). www.ihp.int/ihp_pubs/standard/S-44_5E.pdf.
- Mandlburger, G.; Höfle, B.; Briese, C.; Ressl, C.; Otepka, J.; Hollaus, M.; Pfeifer, N. (2009): Topographische Daten aus Laserscanning als Grundlage für Hydrologie und Wasserwirtschaft. ÖWAW, 7–8 2009, 89–97.
- Wessels, M.; Bussmann, I.; Schlömer, S.; Schlüter, M.; Böder, V. (2010): Distribution, morphology, and formation of pockmarks in Lake Constance, Germany. Limnol. Oceanogr., 55(6): 2623–2633. DOI: [10.4319/lo.2010.55.6.2623](https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.6.2623).
- Zeppelin, E. (1893): Ältere und neuere Bodensee-Forschungen und -Karten; Schriften des Vereins für Geschichte des Bodensees, 22, 21–45.

Kontakt

Dr. Martin Wessels

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Institut für Seenforschung
Argenweg 50/1, 88085 Langenargen

martin.wessels@lubw.bwl.de

UAV-basierte Vermessung von Bergseen

Christian Mulsow | Robert Kenner

1 Motivation

Mit der Überwachung einer Geröllhalde oberhalb des Schottensees in den 1970er Jahren nahm die Gebirgspermafrost-Forschung in der Schweiz ihren Anfang (Haeberli 1975). Aktuelle Untersuchungen (Kenner et al. 2017) beschäftigen sich mit der Chronologie der geomorphologischen Prozesse (siehe Abb. 1). Wichtige Grundlagen sind Kenntnisse über die Oberflächengeometrie, insbesondere die des Gewässerbodens. Bei der photogrammetrischen Erfassung müssen daher den verschiedenen optischen Medien (Wasser und Luft) Rechnung getragen werden.

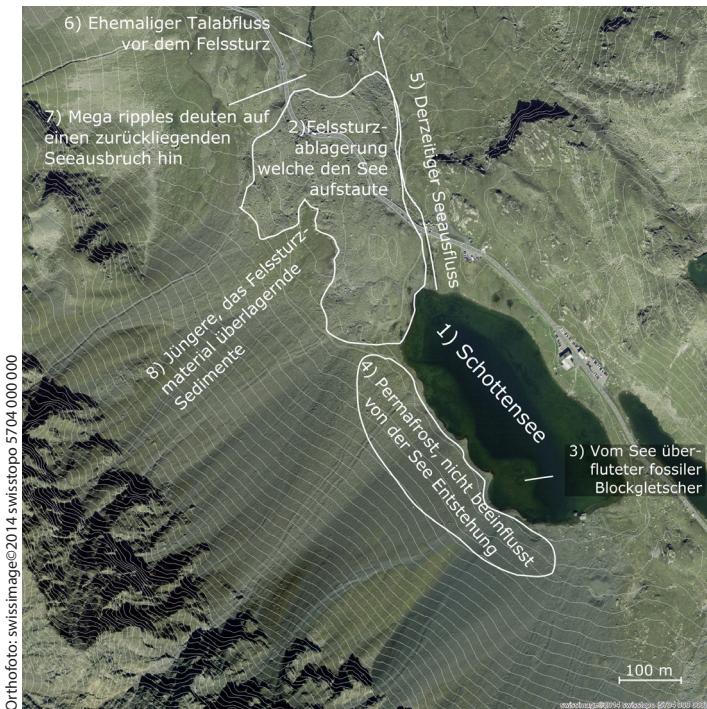


Abb. 1:
Orthophoto des Flüelapass mit Schottensee. Die gekennzeichneten Formationen geben anhand ihrer Nummerierung eine Kurzübersicht der Abfolge der geomorphologischen Prozesse in diesem Gebiet.

2 UAV-Befliegung

Für die schnelle und kostengünstige Aufnahme wurde ein UAV-System bestehend aus einem Falcon 8 Oktokopter der Firma Ascending Technologies (AscTec) und einer Sony NEX-7 Kamera (24 Mpix, 20 mm Objektiv) verwendet (Bühler et al. 2016). Innerhalb eines Tages wurden im September 2016 circa 300 Bilder aus einer Flughöhe von ~100 m über Grund aufgenommen (Bodenauflösung ~2 cm).

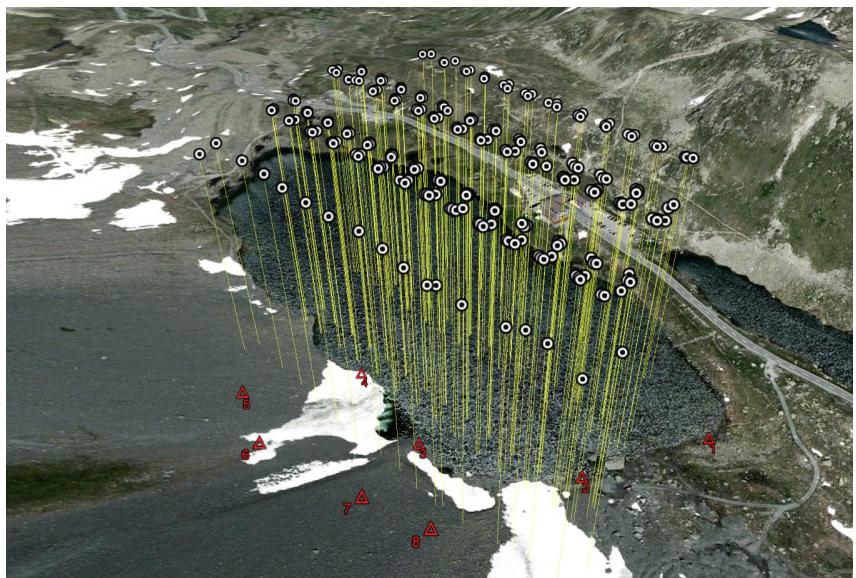


Abb. 2: Der Schottensee mit Bildpositionen und Passpunkten

Der Bildblock weist eine Querüberlappung von 65 % und eine Längsüberlappung von 75 % auf. Näherungswerte für die Kamerapositionen wurden von der UAV-eigenen GPS/IMU-Einheit (IMU – Inertial Measurement Unit – inertiales Messsystem) erfasst. Für die Lagerung des Blockes wurden acht Passpunkte am Boden künstlich signalisiert und mit einem Topcon GR5 GNSS-Empfänger im RTK-Modus mit einer Absolut-Genauigkeit von 10 cm (Konfidenzintervall 95 %) in Höhe und Lage eingemessen. Anhand der Abb. 2 und Abb. 3 ist erkennbar, dass die räumliche Verteilung der Passpunkte nicht optimal ist. Dies ist den örtlichen Gegebenheiten geschuldet. Nichtsdestotrotz sind die relevanten Geländeabschnitte (Lobe und Schutthang) hinreichend abgedeckt. Eine Signalisierung und Aufmessung von Passpunkten am Gewässerboden erfolgte aus logistischen Gründen nicht. Dieser Umstand limitiert die stabile Lagerung von Bildern mit überwiegend Wasserinhalten. Zudem wird eine durchgreifende

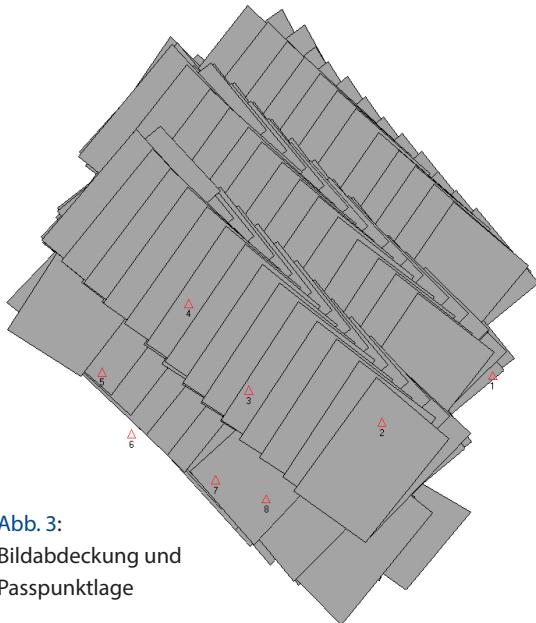


Abb. 3:
Bildabdeckung und
Passpunktlage

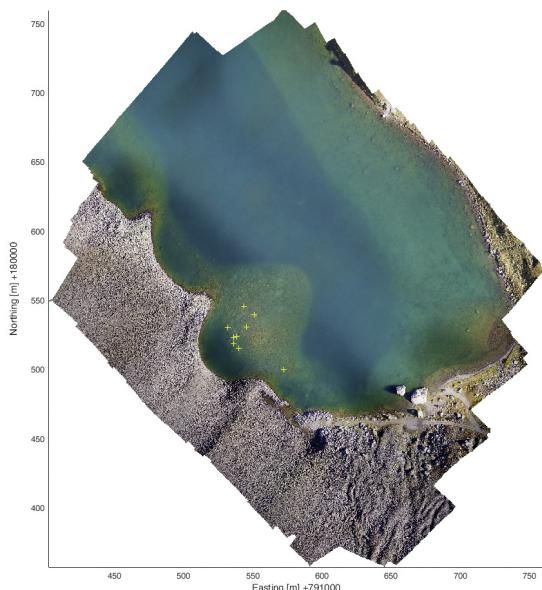


Abb. 4: In PhotoScan (Agisoft) generiertes Orthophoto-mosaik mit Kontrollpunkten (gelbe Kreuze)

Kontrolle der Lage- und Höhengenauigkeit des orientierten Bildblockes in diesen Bereichen unmöglich.

Die Qualität des aufgenommenen Bildmaterials ist alles andere als homogen zu bezeichnen. Eine Reihe von Bildern zeigen ausgeprägte Bewegungsunschärfen. Weiterhin variieren die Bildhelligkeiten. Die Gesamtheit der Bildfehler erforderte eine Reduzierung des Bildmaterials sowie eine Anpassung der Bildmess-Algorithmen.

Einige Monate nach der Befliegung wurden Kontrollpunkte am Gewässerboden mit einem GNSS-Empfänger im RTK-Modus an einem Lotstab bis zu einer maximalen Tiefe von 2,8 m aufgenommen (November 2016 durch Wasser, Dezember 2016 durch Eis). Es wurden ausschließlich Punkte im für die Untersuchungen relevanten Gebiet bestimmt (siehe Abb. 4).

3 Auswertestrategien

Das Finden einer geeigneten Strategie zur Auswertung des vorliegenden Datensatzes gestaltete sich als evolutionärer Prozess. Dieser verlief ausgehend von einer weitestgehend automatischen Prozessierung in einer kommerziellen Software mit all ihren Unzulänglichkeiten bis hin zu einer maßgeschneiderten Lösung zur Ausschöpfung des vollen Potenzials des Datenmaterials. Im Kap. 3.1 werden die einzelnen Strategien separat behandelt und hinsichtlich ihrer Komplexität und Güte betrachtet.

3.1 Auswertung in kommerzieller Software

Zunächst wurde der gesamte Block in PhotoScan Pro (Agisoft) prozessiert. Die Absolutorientierung erfolgte auf Basis der Passpunkte. In der gleichen Software wurde eine georeferenzierte Punktwolke der Oberfläche sowie ein Orthophotomosaik generiert (siehe Abb. 4). Da innerhalb der verwendeten Software keine Modellierung von Refraktionseffekten implementiert ist, ist das extrahierte Geländemodell (DGM) nur für die Landbereiche gültig. Theoretisch sollten Unterwasserbereiche im digitalen DGM tendenziell zu geringe Tiefen aufweisen. Diese Annahme konnte durch Vergleichsmessungen an den Kontrollpunkten bestätigt werden. Die Abweichungen variierten von 0,3 m für Wassertiefen von 1,3 m bis ~0.8 m für Tiefen von 2,8 m. Da die Beträge der Abweichungen die angestrebte Höhengenauigkeit deutlich übersteigen, ist eine Kompensation der Refraktionseffekte notwendig. Kommerzielle Softwareprodukte beinhalten die entsprechenden Funktionalitäten nicht. Daher wurde für die weitere Prozessierung eine spezielle Software, welche am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung an der TU Dresden für Mehrmedien-Szenarien entwickelt wurde (Mulsow 2010), eingesetzt.

3.2 Auswertung mit Refraktionskompensation

Werden Objekte durch refraktive Trennflächen unterschiedlicher optischer Medien hindurch aufgenommen, müssen die dabei auftretenden Effekte bei der Auswertung mitberücksichtigt werden. In der konventionellen Ein-Medien-Photogrammetrie (Medium Luft) kann der optische Abbildungsvorgang als Lochkamera modelliert werden. Dabei wird angenommen, dass sich ein Objektpunkt zusammen mit dem Projektionszentrum der Kamera sowie dem zugehörigen Bildpunkt auf einer Linie befindet. Diese als Kollinearität bezeichnete Eigenschaft kann als fundamentale Grundannahme der Photogrammetrie angesehen werden. Befinden sich zwischen Aufnahmesystem und Objektpunkt weitere Medien mit unterschiedlichen Brechungseigenschaften (Mehrmedienfall)

gilt die Kollinearität in der Regel nicht mehr, da die Richtung des Bildstrahls beim Medienübergang verändert wird (Snelliussches Brechungsgesetz). Daher ist eine entsprechende Erweiterung des Abbildungsmodells notwendig.

In der Luftbildphotogrammetrie wurde die Mehrmedienproblematik seit den 1940er Jahren diskutiert. Es wurden diverse Lösungen für die photogrammetrische Erfassung von Unterwasserstrukturen präsentiert. Rinner (1948) schlug die stufenweise Reduktion des Problems hin zum Einsatz von analytischen Plottern zur Gewässerbodenkartierung. Dabei sollten Refraktionseffekte entweder durch das Anbringen von Korrekturtermen an die Bildkoordinaten oder die Kamerakonstante rechnerisch kompensiert werden. Damit war es möglich, die weit verbreiteten analytischen Plotter auch zur Gewässerbodenkartierung zu verwenden. Erste praktische Anwendungen präsentierte Tewinkel (1963). In den darauffolgenden Jahrzehnten wurden verschiedenste Ansätze zur Kompensation von Refraktionseffekten veröffentlicht, wie die von Freyer (1983) oder Butler (2002). In der Regel werden dabei die konventionell über Vorförtschnitt berechneten Punktkoordinaten mit einem Zusatzterm korrigiert. Dabei müssen die innere und äußere Orientierung der Bilder sowie die Parameter der refraktiven Trennfläche bekannt sein.

Eine integrierte Lösung des Problems wurde von Kotowski (1987) präsentiert. In dem entwickelten Modell wird die Richtung eines Bildstrahls wie herkömmlich bildseitig durch den Bildpunkt und das Projektionszentrum festgelegt.

Da die Kollinearität mit dem Objektpunkt im Mehrmedienfall in der Regel nicht gegeben ist, wird anstatt des Objektpunktes der dem Projektionszentrum auf dem Abbildungsweg am nächsten liegende Trennflächendurchstoßpunkt (P_1 in Abb. 5) in das zentralperspektive Modell eingeführt. Diese setzt wiederum voraus, dass der gesamte Abbildungspfad durch die verschiedenen Medien rekonstruiert wird (Ray-tracing). Die Vorteile dieses Ansatzes liegen

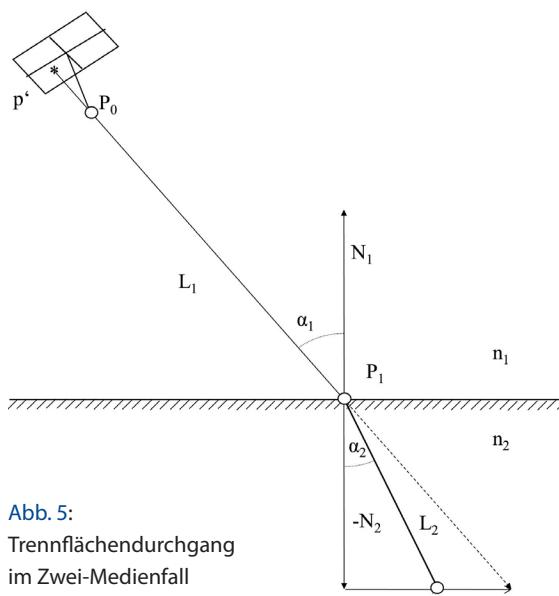


Abb. 5:
Trennflächendurchgang
im Zwei-Medienfall

in der Universalität, der Flexibilität sowie der einfachen Integrierbarkeit in ein Bündeltriangulationsprogramm. Eine vereinfachte Version dieses Ansatzes wurde von Maas (2015) für ebene Trennflächen entwickelt.

Eine Software-Implementation des Ansatzes von Kotowski erfolgte durch Mulsow (2010). Da sich der Raytracing-Ansatz von Kotowski als wenig robust erwies, wurden diverse Raytracing-Algorithmen entwickelt und integriert. Das Programm konnte seine Leistungsfähigkeit bei diversen praktischen Anwendung unter Beweis stellen (Mulsow et al. 2010, Mulsow et al. 2014a). Wie bei einer konventionellen Bündellösung können alle Parameter als Unbekannte behandelt werden. Neben der inneren und äußeren Orientierung sowie den Neupunktkoordinaten können auch Trennflächenparameter und Brechungsindizes simultan mitbestimmt werden. Eine umfangreiche Beschreibung des Ansatzes erfolgt in (Mulsow et al. 2010) und (Mulsow 2016).

4 Datenprozessierung

Wie eingangs erwähnt, wurden die Daten auf unterschiedliche Art und Weise prozessiert. Naheliegend war die Nutzung der in PhotoScan berechneten Orientierungen und Punktmessungen für einen Mehrmedien-Vorwärtsschnitt zur Koordinatenberechnung von Unterwasserpunkten (siehe [Kap. 4.1](#)). Die Nutzung der Orientierung ist jedoch nicht unproblematisch. Daher wurden die Bilder in einem Mehrmedien-Bündel orientiert (siehe [Kap. 4.2](#)). Die Strategie für die DGM-Extraktion wird im [Kap. 4.3](#) erläutert.

4.1 Vorwärtsschnitt mit Refraktionskompensation

Der folgende Ansatz ist anwendbar, wenn die Orientierungen der Bilder, die Kameraparameter, die Trennfläche sowie der Brechungsindex des Zielmediums bereits vorliegen. Wie bereits oben erläutert, können die Oberflächenpunkte von Unterwasserstrukturen dann über einen Mehrmedien-Vorwärtsschnitt bestimmt werden. Ausgehend vom Bildraum kann der Bildstrahl in den Objektraum verlängert werden. Im Schnittpunkt des Bildstrahls mit der Trennfläche Wasseroberfläche (Gerade-Ebenen-Schnitt), lässt sich über folgende Formel dessen Richtungsänderung berechnen (Glassner 1989):

$$L_2 = \frac{L_1}{n} + \left(\frac{C}{n} - \sqrt{1 + \frac{1}{n^2} (C^2 - 1)} \right) N_1$$

mit

$$C = -N_1 \cdot L_1, \quad \mathbf{n} = \frac{\mathbf{n}_2}{n_1} \quad (1)$$

L_1 = normalisierter Richtungsvektor des eintreffenden Strahls

L_2 = Richtungsvektor des ausgehenden Strahls (nicht normiert)

N_1 = Flächennormale von Trennfläche T_1 in P_1

n = relativer Refraktionsindex

Es kann also für jeden im Bild gemessenen Unterwasserpunkt ein Bildstrahl im Zielmedium Wasser berechnet werden. Als Ursprung wird der Schnittpunkt mit der Wasseroberfläche und als Richtung der gebrochene Bildstrahl eingesetzt. Über einen einfachen Geradenschnittalgorithmus können dann aus mindestens zwei korrespondierenden Bildstrahlen die Punktkoordinaten berechnet werden.

Wie oben bereits erwähnt, setzt dieses Verfahren korrekt bestimmte Orientierungs- und Kameraparameter voraus. Eine Analyse der in PhotoScan berechneten Orientierungen zeigte, dass diese nicht den Genauigkeitsanforderungen genügten. Die nicht berücksichtigte Refraktion sorgte für eine Verfälschung der Orientierungsparameter von Bildern mit überwiegender Gewässerüberdeckung sowie eine Beeinflussung der Parameter der radialsymmetrischen Verzeichnung. Letztere begründen sich aus der starken Korrelation von Refraktion und Verzeichnung bei Bildblöcken mit Aufnahmerichtungen ähnlich zur Normalenrichtung der Trennfläche und kleinen Wassertiefen relativ zur Flughöhe (Freyer et al. 1986). Daher war es notwendig, die Orientierungen innerhalb einer Mehrmedien-Bündeltriangulation zu bestimmen.

4.2 Mehrmedien-Bündel

Zunächst wurde das vorliegende Datenmaterial hinsichtlich des Umfangs reduziert. Unscharfe Bilder und überbelichtete bzw. unterbelichtete Aufnahmen wurden aussortiert. Zudem wurden nur Aufnahmen im Bildblock belassen, welche für die geomorphologischen Analysen relevanten Gebiete beinhalteten (siehe Abb. 6).

Zunächst wurde der Block in LPS 9.3 (ERDAS, Hexagon) bearbeitet. Im Ergebnis standen automatisch generierte Verknüpfungspunkt-Messungen, manuell gemessene Passpunkte sowie Näherungswerte für die Orientierungen zur Verfügung. Danach erfolgte eine semi-automatische Klassifizierung der Unterwasser-Punkte. In Summe wurden 41 Bilder ausgewertet. 6 Bilder weisen eine Wasserüberdeckung von mindestens 70 % auf. Die stabile Verknüpfung gewährleisten ~900 Verknüpfungspunkte (davon ~150 Unterwasserpunkte).

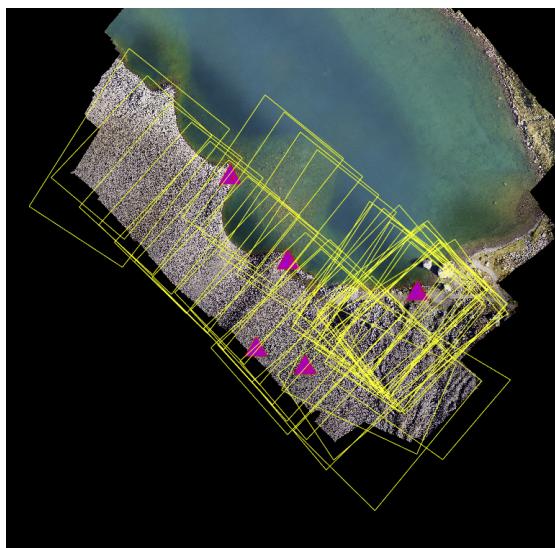


Abb. 6:
Reduzierter Bildblock, der
im Mehrmedien-Bündel
prozessiert wurde.

Circa 8000 Bildmessungen wurden der weiteren Verarbeitung im Mehrmedien-Bündel übergeben. Die Bündeltriangulation erfolgte in unterschiedlichen Parameterkonfigurationen:

- I. Ausgleichung mit sämtlichen Bildmessungen, alle Punkte als Ein-Medien-Punkte (Landpunkte) behandelt,
- II. Triangulation auf Basis der auf Land gemessenen Punkte, nur Bilder mit mindestens 70 % Landüberdeckung,
- III. Ausgleichung mit festgehaltenen Kamerakalibrierparametern (aus Durchlauf II) und fixierten Bildorientierungen von bereits in Durchlauf II berechneten Bildern, Unterwasserpunkte als Mehrmedien-Punkte behandelt,
- IV. Simultane Bestimmung aller Unbekannten (sämtliche Orientierungen und Kameraparameter), Unterwasserpunkte als Mehrmedien-Punkte behandelt.

Die Mitbestimmung der Ebenenparameter der Wasseroberfläche sowie des Brechungsindex von Wasser schlug auf Grund von hohen Korrelationen zwischen den genannten Parametern und den Orientierungen (äußere und innere) fehl. Ursächlich dafür sind die geringen Einfallswinkel der Bildstrahlen (max. $\sim 20^\circ$ relativ zur Ebenennormale) sowie das geringe Verhältnis von Wassertiefen zu Aufnahmeentfernung.

Die wichtigsten Ergebnisse der einzelnen Berechnungsdurchläufe sind in Tab. 1 aufgeführt. Anhand der mittleren Abweichungen der Höhen der Unterwasserkontrollpunkte kann Parameterkonfiguration Nr. III als am geeignetsten identifiziert werden.

Tab. 1: Resultate der einzelnen Berechnungsdurchläufe

Genauigkeitsparameter	Parameter-Konfiguration Nr.			
	I	II	III	IV
s_0 [px]	0.48	0.47	0.49	0.49
RMS x' y' [px] Land	0.43/0.44	0.42/0.43	0.42/0.43	0.43/0.44
RMS x' y' [px] Wasser	0.44/0.43	–	0.51/0.51	0.46/0.46
c_k [mm]	20.443	20.467	20.467	20.441
x_H [mm]	–0.0027	–0.0018	–0.0018	–0.0030
y_H [mm]	0.0584	0.0552	0.0552	0.0587
RMS X/Y/Z [cm] Land	1.7/1.4/4.4	1.5/1.2/3.8	1.5/1.2/3.8	1.7/1.4/4.4
RMS X/Y/Z [cm] Wasser	1.0/1.7/4.4	–	0.9/1.6/5.3	1.0/1.8/6.0
Kontrollpunkte Unterwasser				
RMS Z [cm]	2.9		3.5	4.0
RMS [cm] $Z_{\text{soll}} - Z_{\text{ist}}$	65.8	–	11.8	14.5

Beim Vergleich der inneren Genauigkeiten der Koordinaten der Unterwasserpunkte fallen die niedrigen Werte für Konfiguration Nr. 1 auf. Dies kann mit den besseren Schnittgeometrien für diese Punkte bei Nichtberücksichtigung der Refraktion begründet werden. Da die Bildstrahlen beim Eintritt in das optisch dichtere Medium Wasser zur Oberflächennormale hin gebrochen werden, verringert sich zwangsläufig der Schnittwinkel von homologen Abbildungsgeraden (Maas 2015). Im Durchlauf I wurden die Unterwasserpunkte wie refraktionsfreie Landpunkte behandelt und daher liegen dann größere Schnittwinkel vor. Nichtsdestotrotz sind die in Berechnung I ermittelten Höhen von Unterwasserpunkten systematisch verfälscht, wie die RMS-Werte (Root Mean Square) an den Kontrollpunkten zeigen. Wie erwartet, liegen die Restklaffungen der Bildmessungen von Unterwasserpunkten über den von Landpunkten. Dies kann zum einen mit der schlechteren Abbildungsqualität (Dispersion, Lichtabfall etc.) und zum anderen mit nicht kompensierten Restsystematiken (variierender Brechungsindex) begründet werden.

4.3 DTM-Generierung für Unterwasserbereiche

Analog zu etablierten Verfahren zur Geländemodellextraktion wurden zunächst die Bilder paarweise in Stereonormalbilder umgewandelt. Die somit von Y-Parallaxen weitestgehend befreiten Bildpaare erleichtern die Suche von homologen

Punkten. Im Mehrmedienfall ist diese Parallaxenfreiheit auf Grund der Refraktion nicht gegeben, da die Kernlinien als Kurven abgebildet werden. In dem vorliegenden Fall (Aufnahmerichtung nahezu parallel zur Oberflächennormale der Trennfläche, geringe Wassertiefe im Vergleich zum Aufnahmearstand) ist dieser Effekt hinreichend klein. Lokal kann daher die Kernlinie als Gerade angesehen werden.

Angelehnt an Standard-Matchingverfahren wurden die Suchprozesse hierarchisch gestaltet (Bildpyramiden-Ansatz). Ausgangspunkt ist ein in der Auflösung um den Faktor 5 verringertes Bildpaar. Das Referenzbild wurde zunächst in ein 75×50 Zellenraster unterteilt. Für jede Zelle erfolgte dann die Bestimmung des besten Merkmalpunktes (Harris-Operator). Diese Vorgehensweise wurde wegen einer möglichst vollständigen Erfassung des Messgebietes gewählt. Eine ausschließliche Nutzung der besten globalen Merkmalspunkte hätte zu Modell-Lücken in kontrastarmen Unterwasserbereichen geführt. Die extrahierten Harris-Punkte wurden dann über Least Squares Matching (LSM) im Stereo-partner identifiziert und subpixelgenau vermessen (Patch-Größe 21×21 Pixel, Verschiebung in x und ein Maßstabsparameter). Aus den Parallaxendifferenzen wurde eine Disparitätskarte der aktuellen Auflösungsstufe gebildet. Diese diente als Näherungswert für den Suchbereich der nächst höheren Auflösungsstufe. Dieser Vorgang wurde bis zum Erreichen der vollen Auflösungsstufe iterativ durchgeführt. Die transformierten Bildkoordinaten der homologen Punktpaare dienten dann in einem finalen Matching-Prozess in den originalen Bildern als hochgenaue Näherungswerte. Die über LSM mit vollem Parameterumfang gewonnenen Bildkoordinaten können als von Refraktionseffekten unbeeinflusst angesehen werden.

Die automatische Trennung von Land- und Unterwasserpunkten erfolgte über die Analyse der Höhenwerte welche über konventionellen (Ein-Medien-) Vorwärtsschnitt gewonnen wurden. Nur Punkte unterhalb des bekannten Wasserspiegels wurden über Mehrmedien-Vorwärtsschnitt (siehe Kap. 4.1) nochmals bestimmt. Die Berechnung erfolgte auf Basis der in Durchlauf III bestimmten Bildorientierungen und Kameraparameter.

5 Ergebnisse

Das Hauptziel des Projektes bestand in der Gewinnung eines DGM für den Bereich der Lobe (siehe Abb. 1). Daher konzentriert sich die Analyse der Ergebnisse auf diesen Bereich.

Die Genauigkeit kann keineswegs als homogen angesehen werden. Wie Abb. 7 zeigt, fällt die Abbildungsqualität mit steigender Wassertiefe ab. Daraus lässt sich auch ein Abfallen der Genauigkeit ableiten. Es konnten Punkte bis zu einer



Abb. 7: Variierende Abbildungsqualität von Land- und Unterwasserstrukturen

Wassertiefe von ca. 3,5 m hinreichend zuverlässig bestimmt werden.

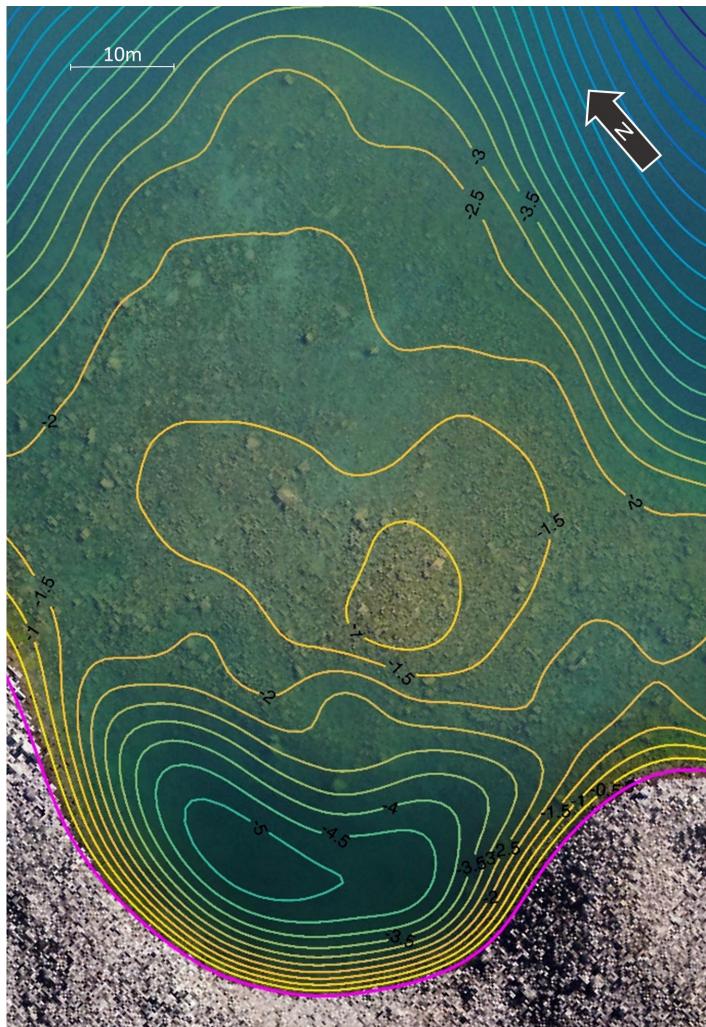
Zur Verdeutlichung des Einflusses der Refraktion auf das DGM bei Nichtbeachtung wurde zusätzlich ein zweites Modell ohne Berücksichtigung der Mehrmedien-Effekte berechnet. Wie erwartet liegt das DGM ohne Refraktionskompensation über dem eigentlichen Gewässerboden (siehe Abb. 8 und Abb. 9). Abb. 10 verdeutlicht diesen Umstand entlang eines Profils. Die Abweichungen betragen 30 bis 40 % der eigentlichen Wassertiefe. Die

Genauigkeit des DGM kann aus dem RMS der Abweichungen an den Kontrollpunkten mit 12 cm (siehe Tab. 1) abgeschätzt werden.

Zu Analysezwecken wurde das DGM mit der modellierten Wasseroberfläche verschnitten und die erhaltene Linie in die Bilder projiziert. Aus dem visuellen Vergleich von berechneter und abgebildeter Wasserlinie kann auf die Stimmigkeit der Ergebnisse geschlossen werden. In Abb. 7 und Abb. 8 lässt sich das gute Zusammenpassen der Uferlinien erkennen.

6 Fazit und Ausblick

Der vorliegende Beitrag versucht dem potenziellen Anwender einen photogrammetrischen Workflow für die Generierung von Oberflächenmodellen von Unterwasserformationen aus Luftbildern an die Hand zu geben. Es konnte verdeutlicht werden, dass Refraktionseffekte unbedingt bei der Punktberechnung mitberücksichtigt werden müssen. Leider bieten kommerzielle Softwarelösungen keine entsprechenden Funktionalitäten. Daher wurde ein spezielles Mehrmedien-Bündelprogramm genutzt. Die mit steigender Wassertiefe abfallende Abbildungsqualität sowie Refraktionseffekte erforderte die Anpassung



bekannter Zuordnungsstrategien. Die Genauigkeit der bestimmten Unterwasserpunkte liegt wie erwartet unter denen an Land. Nichtsdestotrotz liegt die evaluierte Höhengenauigkeit mit einem RMS von 12 cm über denen anderer optischer Verfahren (z. B. Laserbathymetrie).

Im Verlauf des Projektes wurden einige Möglichkeiten zur Verbesserung identifiziert. Bereits bei der Flugplanung sollten die speziellen Anforderungen an eine Unterwasserpunktbestimmung berücksichtigt werden. Für größere Triangulationswinkel sollten Objektive mit größerem Öffnungswinkel zum Einsatz

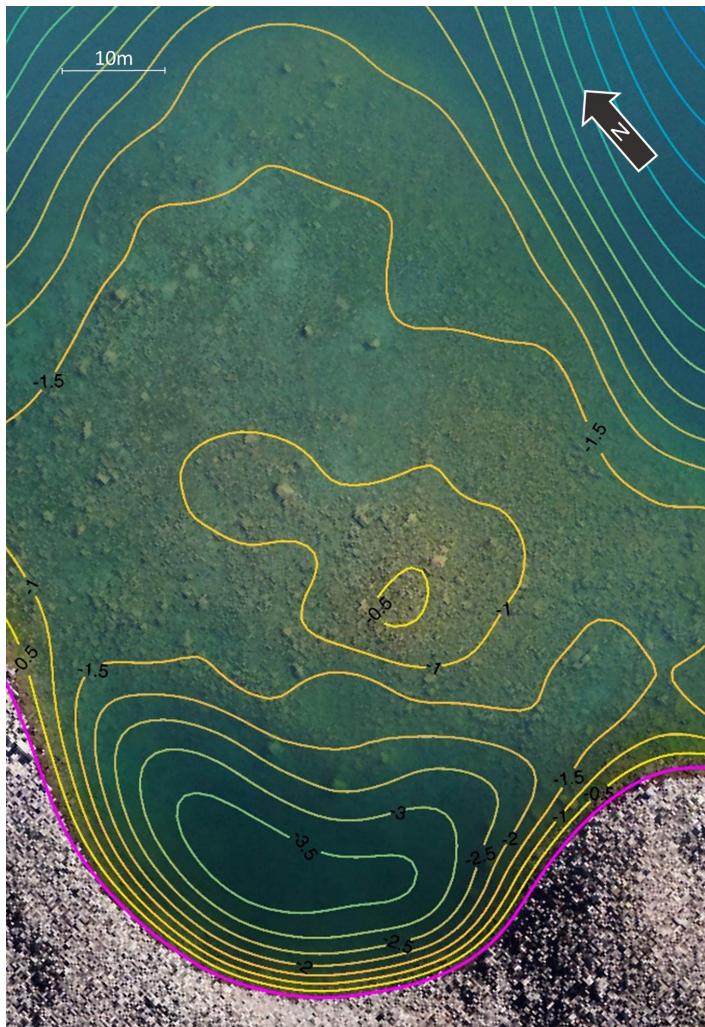


Abb. 9:
DGM aus konventionellem Vorwärts-schnitt. Die Wasser-tiefe sind sys-tema-tisch ver-fälscht.

kommen. Denkbar wäre auch die Nutzung von Schrägaufnahmen. Hier ist jedoch zu beachten, die Aufnahmerichtung nicht zu sehr aus der Lotrechten zu schwenken da ansonsten Welleneffekte und Totalreflektionen die Abbildungsqualität zu stark abfallen lassen. Für eine stabilere Lagerung des Blockes sowie für eine durchgreifende Kontrolle der Ergebnisse sollten Passpunkte am Gewässerboden signalisiert und aufgemessen werden. Weiterhin sollten die Möglichkeiten der automatischen Extraktion der Wasserlinie in den Bildern untersucht werden. Wie bereits in den Abbildungen verdeutlicht, kann anhand der

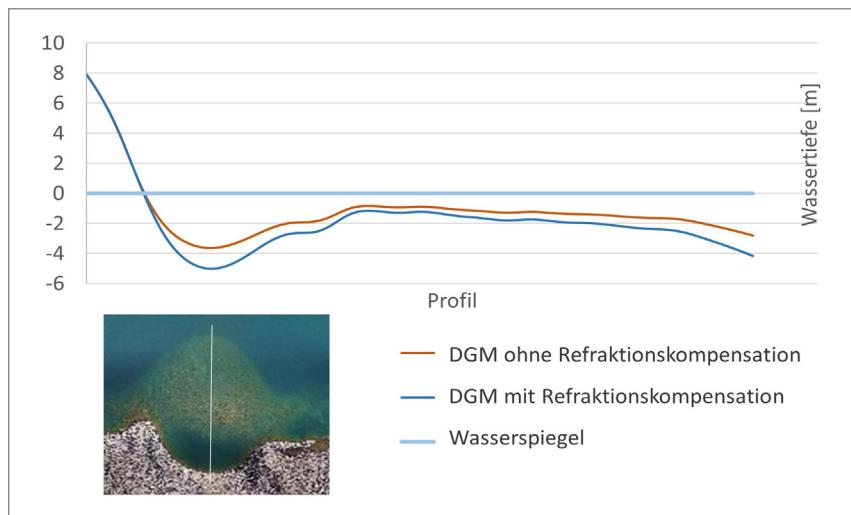


Abb. 10: Vergleich der mit und ohne Refraktionskompensation generierten DGM-Höhen entlang eines Profils.

Helligkeits- und Farbunterschiede auf die Grenzlinie zwischen Wasser und Ufer geschlossen werden (siehe auch Krönert et al. 2017, Mulsow et al. 2014b). Gute Näherungswerte für die Lage im Bild lassen sich aus dem Schnitt des DGM mit der Wasseroberfläche bereitstellen. Die extrahierte Uferlinie könnte dann in der Bündelblockausgleichung als Höhenpasspunktlinie mitgenutzt werden.

Literatur

- Bühler, Y.; Adams, M. S.; Bösch, R.; Stoffel, A. (2016): Mapping snow depth in alpine terrain with unmanned aerial systems (UASs): potential and limitations. *The Cryosphere* 10(3): 1075–1088.
- Butler, J.; Lane, S.; Chandler, J.; Porfiri, E. (2002): Through-Water Close Range Digital Photogrammetry in Flume and Field Environments. *The Photogrammetric Record*, 17: 419–439. DOI: [10.1111/0031-868X.00196](https://doi.org/10.1111/0031-868X.00196).
- Fryer, J. G. (1983): Photogrammetry through shallow water. *Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry and Surveying*, 38: 25–38.
- Fryer, J. G.; Fraser, C. S. (1986): On the calibration of underwater cameras. *The Photogrammetric Record*, 12 (67), 73–85.
- Glassner, A. S. (1989): An Introduction to Ray Tracing. Academic Press, London.
- Haeblerli, W. (1975): Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grailetsch (Graubünden). Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 17, Zurich, 221 S.

- Kenner, R.; Phillips, M.; Hauck, C.; Hilblich, C.; Mulsow, C.; Buhler, Y.; Stoffel, A.; Buchroithner, C. (2017): New insights on permafrost genesis and conservation in talus slopes based on observations at Flüelapass, Eastern Switzerland. *Geomorphology*, 290, 110–113.
- Kotowski, R. (1987): Zur Berücksichtigung lichtbrechender Flächen im Strahlenbündel. Schriftreihe der DGK, Reihe C, Volume 330.
- Kröhner, M.; Meichsner, R. (2017): Segmentation of environmental time lapse image sequences for the determination of shore lines captured by hand-held smartphone cameras. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-2/W4* (2017), 1–8.
- Maas, H.-G. (2015): On the Accuracy Potential in Underwater/Multimedia Photogrammetry. *Sensors* 2015, 15(8), 18140–18152. DOI: [10.3390/s150818140](https://doi.org/10.3390/s150818140).
- Mulsow, C. (2010): A flexible multi-media bundle approach. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK.
- Mulsow, C., (2016): Ein universeller Ansatz zur Mehrmedien-Bündeltriangulation. In: Luhmann, T., Schumacher, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik*, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016, Wichmann.
- Mulsow, C.; Koschitzki, R.; Maas, H.-G. (2014b): Photogrammetric monitoring of glacier margin lakes. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*.
- Mulsow, C.; Maas, H.-G. (2014a): A universal approach for geometric modelling in underwater stereo image processing. *Computer Vision for Analysis of Underwater Imagery (CVAUI)*, ICPR Workshop, Stockholm.
- Rinner, H. (1948): Problems of two medium photogrammetry. *Photogrammetric Engineering*, 35(2), 275–282.
- Tewinkel, G. C. (1963): Water depths from aerial photographs. *Photogrammetric Engineering* 29 (1963), 1037–1042.

Kontakt

Christian Mulsow

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden

Helmholtzstraße 10, 01062 Dresden

christian.mulsow@tu-dresden.de

Robert Kenner

WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

Davos, Schweiz

robert.kenner@slf.ch

Flugzeuggestützte hydro-bathymetrische Überwachungsmessungen in renaturierten Braunkohle-Tagebaugebieten

Sven Jany

1 Kurzvorstellung des Unternehmens

Die MILAN-Flug GmbH wurde im Winter 2000 als 100 %ige Tochtergesellschaft der eta AG engineering, einem Ingenieurbüro mit mehr als 100 Arbeitnehmern, gegründet und führt deren Geschäftsfeld des Airborne Laserscannings sowie der Digitalen Photogrammetrie seit Mitte des Jahres 2002 weiter. Mit der Ausgliederung dieses Geschäftsfeldes aus der Muttergesellschaft wurden das hochqualifizierte Personal und das vorhandene Know-how übernommen. Im Zuge der Umfirmierung und der Erweiterung der Geschäftsfelder im Jahr 2007 änderte die MILAN-Flug GmbH ihren Namen in MILAN Geoservice GmbH.

Seit 2001 besitzt die MILAN Geoservice GmbH ihre eigenen Laserscanningsysteme. Damit wurden bereits mehrere Zehntausende Quadratkilometer Geländeoberflächen gescannt und als digitale Höhenmodelle ausgewertet. Die meisten dieser Modelle wurden für Anwendungen erzeugt, deren Daten eine sehr hohe Auflösung und eine hohe Präzision erfordern.

Um die kundenorientierte Auswertung der Laserdaten ständig zu verbessern, erweiterte die MILAN Geoservice GmbH ihre Airborne-Sensorik um einen zusätzlichen RGB-Sensor, welcher digitale RGB-Informationen zu jedem Laserschuss ermöglicht. Die zum Einsatz kommende Vor- und Nachbearbeitungssoftware ist fortlaufend weiter entwickelt und angepasst an die erweiterten Fähigkeiten der neuen Sensoren.

1.1 Einführung

Das Verfahren des Airborne Laserscannings hat sich in den letzten 17 Jahren weltweit einen festen Platz bei der Generierung von digitalen Höhenmodellen (DHM) verschafft. Die Datenmodelle sind Basis für Planungsgrundlagen im Bergbau, der Wasserwirtschaft, des Straßen- und Städtebaues und vielen anderen Bereichen.

Aufgrund der hohen Durchdringungsfähigkeit in Vegetationsbereichen mittels des Airborne Laserscanningverfahrens ist es möglich, zwei separate, aber

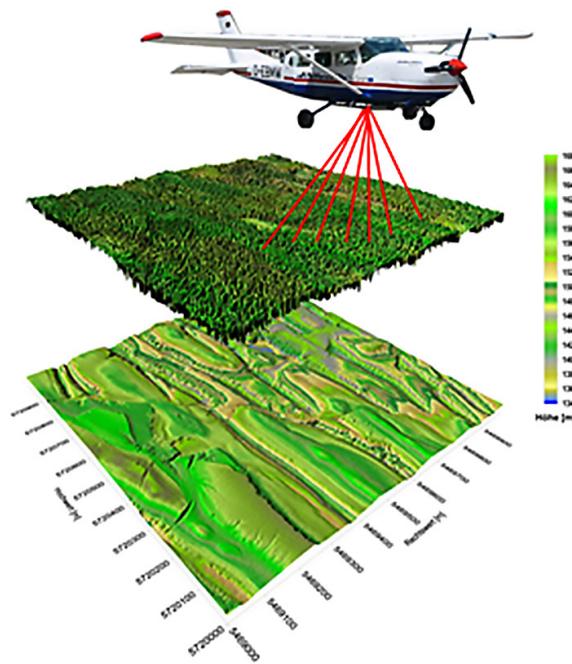


Abb. 1: Oben: DSM (digital surface model) Oberflächenmodell mit Vegetation und Bebauung. Unten: DTM (digital terrain model) Bodenmodell ohne Vegetation und Bebauung.

flächenkonforme Digitale Höhenmodelle zu erzeugen (Abb. 1).

Die Laserscansysteme sind im Flugzeug bzw. Helikopter fest integriert und es werden heute bis zu 1.000.000 Lasermesswerte pro Sekunde gesendet sowie empfangen. Aus den Lasermesswerten werden in der Regel ein geometrisches Raster mit variabler Rasterweite (0,25 m – 10 m) bzw. klassifizierte 3D-Rohdaten abgeleitet. Die 3D-Lasermesswerte (X,Y,Z) werden u.a. in Bodenpunkte, Vegetationspunkte und Bebauungspunkte klassifiziert.

1.1.1 Prinzip und Funktionsweise Airborne Lasercanning

Digitale Höhenmodelle, erzeugt mittels dem Airborne Laserscanning, werden heute mit einer Rasterweite bis zu 1 m und besser sowie einer Höhenauflösung von 0,01 m erstellt. Die Lagegenauigkeit der Höhenmodelle ist (für jeden Rasterpunkt) besser als $\pm 0,5$ m und die absolute Genauigkeit der Rasterhöhen (gegenüber dem lokalen Geoid) ist besser als $\pm 0,05$ m (mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von für 95 %).

Grundlage sind Laserscanner, die bei hohen Messraten (bis zu 1000 kHz) eine mittlere Messdichte von etwa 4 bis 10 Messwerten je m^2 erlauben. Die hohe Messdichte stellt sicher, dass auch relativ kleinräumige Strukturen wie Entwässerungsgräben, Dämme oder Bruchstrukturen zuverlässig erkannt werden. Darüber hinaus gewährleistet diese Messdichte die sehr genaue Lokalisierung von Bruchkanten oder GebäudeumrisSEN. Das übliche Reihenhaus mit 80 m^2 Grundfläche wird mit ca. 400 Messungen erfasst und im 1-m-Raster mit 80 Höhenwerten beschrieben.

Die Basisverarbeitung der Laserscannerdaten führt zu einem Höhenmodell, das präzise die Geländeoberfläche (Oberkante der Vegetation, Dachhöhen der Häuser etc.) beschreibt; ein derartiges Höhenmodell wird oft auch Digital Surface Model (DSM), genannt. In einem weiteren Arbeitsschritt können höhere Vegetation und auch Gebäude entfernt werden, so dass ein Höhenmodell der Erdoberfläche (DTM, Digital Terrain Model) berechnet wird.

Die hohe Messdichte bzw. die enge Rasterweite der Höhenmodelle gestattet weitergehende Auswertungen wie etwa die Vektorisierung der Gebäude sowie die Extraktion von Strukturelementen wie Gräben, Bruchkanten oder Dämmen.

1.1.2 Hydrobathymetrie-Laserscanning

Im Bereich von Wasserflächen kommt das Verfahren der Laserbathymetrie zum Einsatz. Um die Sohle messtechnisch erfassen zu können, werden durch full-waveform-Analyse mit den Lasersignalen sowohl die Wasseroberflächen als auch mit Berücksichtigung der Brechungseigenschaften des Wassers die Gewässersohle erfasst (Abb. 2).

Dieses Verfahren wird mit dem sog. grünen Scanner durchge-

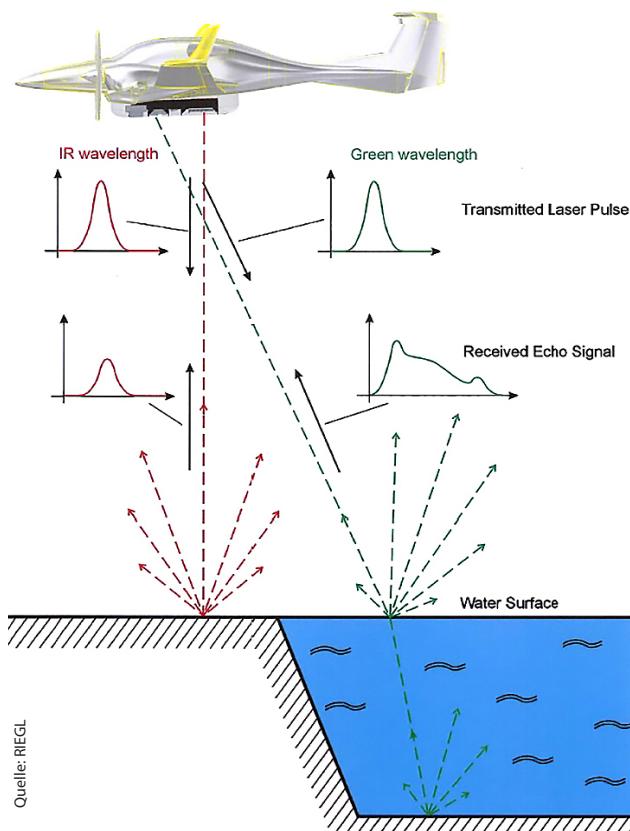


Abb. 2:
Funktionsskizze
Vergleich Eigen-
schaften roter und
grüner Laser-
scanner

führt, welcher die technischen Eigenschaften besitzt, durch Wasser zu dringen und so See- oder Flussböden zu erfassen. Allerdings müssen dafür besondere Bedingungen vorherrschen, insbesondere sollte der Untergrund möglichst hell sowie fest beschaffen und das Wasser klar und ohne Trübung sein.

Bei dieser Technik durchdringt der grüne Laserstrahl des Scanners die Wassersäule einige Meter (in klaren, nicht turbulenten Gewässern bis zu 3 bis 5 m). Aus den reflektierten Signalen lassen sich die Wassertiefe und andere Informationen (z. B. Wasseroberfläche, Vegetationshöhen etc.) bestimmen und klassifizieren. In jeder Sekunde werden von diesem System 500.000 Messwerte erzeugt. Mit diesem innovativen Verfahren lassen sich Unterwasserobjekte, die Flachwasserzone und die unmittelbaren Uferbereiche vermessen.

Anwendungsgebiete findet man beispielsweise im Küstenschutz, aber auch in Sanierungsgebieten von Tagebauen.

Die Abb. 3 bis 6 zeigen Beispiele des Projekts Tahiti-Tetiarora, Mai 2017.

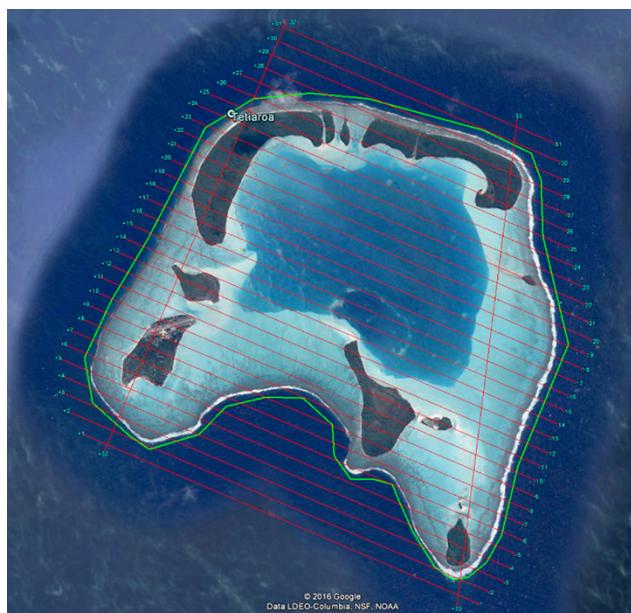


Abb. 3:
Flugplanung Atoll
Tetiaroa (Franz.
Polynesien)

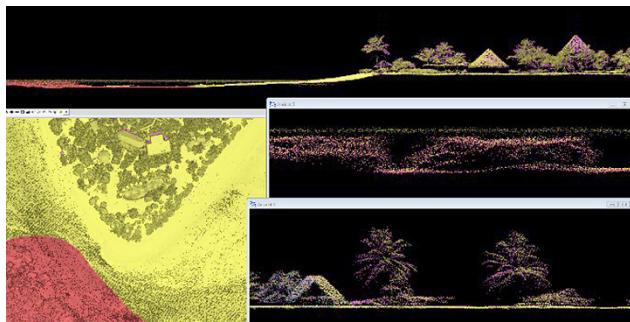


Abb. 4:
DHM, abgeleitet aus Hydrobathymetrie-Laserscanning-Daten Tahiti, Tetiaroa, (Franz. Polynesien)

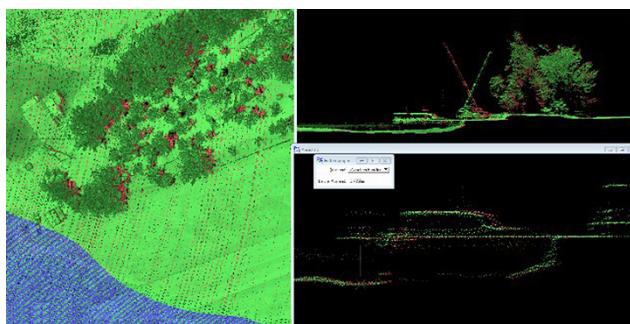


Abb. 5:
DHM, abgeleitet aus Hydrobathymetrie-Laserscanning-Daten Tahiti, Tetiaroa, (Franz. Polynesien)

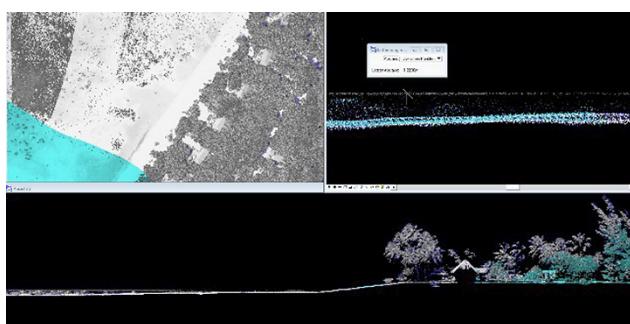


Abb. 6:
DHM, abgeleitet aus Hydrobathymetrie-Laserscanning-Daten Tahiti, Tetiaroa, (Franz. Polynesien)

Kontakt

ADM Dipl.-Ing. Sven Jany
MILAN Geoservice GmbH
Schäfereistraße 24, 03130 Spremberg
s.jany@milan-geoservice.de

Korrektur Schifffahrtsrinne Basel-Stadt – Hydrographie im Rahmen eines Infrastrukturprojektes

Andreas Prokoph

1 Die Bedeutung des Rheins für das Binnenland Schweiz

Für die Schweiz ist der Rhein die einzige Wasserstraße mit direktem Zugang zu den Seehäfen Rotterdam, Antwerpen und Amsterdam. Dies bedeutet, dass die Hafenanlagen in Basel mit einem Anteil von 12 % am Umschlag aller Importe eine der wichtigsten Verkehrsdrehscheiben des Landes sind. Um die Häfen weiterhin wettbewerbsfähig zu halten, soll der Großschifffahrt eine um 30 cm erhöhte Abladetiefe ermöglicht werden. Deshalb projektiert das Tiefbauamt Basel-Stadt zusammen mit den Schweizerischen Rheinhäfen eine Korrektur der aktuellen Schifffahrtsrinne.

Die von der Baumaßnahme betroffenen Rheinkilometer erstrecken sich von der Landesgrenze bis zu den im Süden von Basel gelegenen Häfen Birsfelden



Abb. 1: Hafen Basel-Stadt

und Muttenz. Ein Großteil des Projektgebietes befindet sich im innerstädtischen Raum (siehe Abb. 1). Um der Komplexität des Projektes auch vermessungstechnisch Rechnung zu tragen, ist die Hydrographie Basel-Stadt bereits seit Beginn der Planungen involviert und wird die Bauarbeiten bis zum Schluss begleiten.

1.1 Projektplanung

Im Zuge der Projektplanung wurden zunächst hochauflösende digitale Geländemodelle der Rheinsohle mit einer Zellengröße von 20 cm erstellt. Basierend auf diesen Daten ermittelte die Hydrographie zusammen mit der Projektleitung

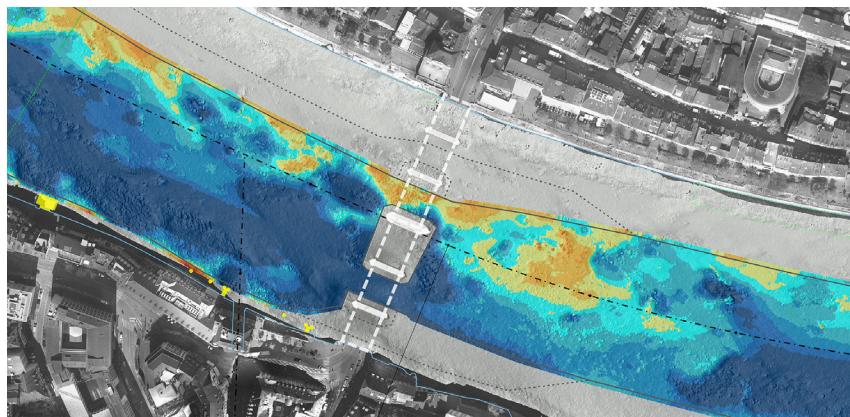


Abb. 2: Korrekturmaßnahme an der Mittleren Rheinbrücke in Basel

das optimale Korrekturziel sowie die zu erwartenden Kubaturen. Des Weiteren lieferten die Fächerecholotmessungen erste Erkenntnisse über die Beschaffenheit des Gewässerbodens. In einem weiteren Arbeitsgang wurde an relevanten Stellen eine Reflexionsseismik gefahren. Diese ermöglichte die Bestimmung der Kiesmächtigkeit über den härteren Felsschichten. Ferner konnte die Lage von festen Sandsteinbänken ausgemacht werden (siehe Abb. 2). Begleitet wurde dies durch 12 Probebohrungen. Zusätzlich wurde ein Remotely Operated Vehicle (ROV) eingesetzt, um den Zustand sowie die Beschaffenheit von Infrastrukturobjekten zu beurteilen. Schlussendlich machten Hydrographische Vermessungen erst eine Aussage über die Machbarkeit und Rentabilität der Baumaßnahme möglich.

1.2 Grundlagen für Begleitstudien

Die erhobenen Daten dienten als Grundlage für wichtige Begleitstudien, welche für die Realisierung des Projektes unabdingbar waren. Beispielsweise sind hier 2D-Strömungsmodellierungen, die Berechnung der Wasserspiegellage und die Evaluierung von Laichplätzen für ökologische Begleitmaßnahmen zu nennen. Auch für die Variantenanalyse verschiedener Abbaumethoden sowie für die Baugrunduntersuchung waren die Messungen unverzichtbar.

1.3 Bauleitung und Qualitätssicherung

Aufgrund der direkten Integration in das Projekt ist die Hydrographie Basel-Stadt mit Teilen der Bauleitung betraut. Dies umfasst vor allem die Kommunikation mit dem Unternehmer vor Ort, sowie die Kontrolle und die Koordination der Baggerarbeiten. Die Komplexität der Baumaßnahme hat zur Folge, dass regelmäßig Kontrollmessungen durchgeführt werden müssen. Erst dies sichert ein vollständiges und hochqualitatives Ergebnis, welches der Großschifffahrt in naher Zukunft höhere Abladetiefen und ein effizienteres Arbeiten ermöglicht.

2 Die Hydrographie: Wesentlicher Teil des Projektes

Die Korrektur der Schifffahrtsrinne in Basel-Stadt zeigt welch tragende Rolle die Hydrographie in größeren Wasserbauprojekten einnimmt. Deshalb macht es Sinn diese so früh wie möglich zu integrieren und in die Projektplanung mit einzubinden. Dabei sind die aus den Daten gewonnenen Erkenntnisse nicht nur in direktem Zusammenhang mit der Baumaßnahme unentbehrlich, auch wird das Fachwissen für begleitende technische Untersuchungen benötigt durch welche das Projekt erst realisierbar wird.

Kontakt

Andreas Prokoph

Tiefbauamt Basel-Stadt

Dufourstrasse 40/50, 4001 Basel, Schweiz

andreas.prokoph@bs.ch

Session 3: Aufgaben im Hochsee- und Küstenbereich

Integration von hochauflösten marinen Geodaten in elektronische Navigationssysteme

Stephan Dick | Luis Becker | Stefan Grammann | Mathias Palm | Jana Vetter

1 Einleitung und Motivation

Durch das Seeaufgabengesetz ist dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) der Gezeiten-, Wasserstands-, Sturmflutwarn- und Nautische Informationsdienst im Bereich der Seeschifffahrt übertragen. Im Einzelnen werden Produkte der Dienste für die manuelle Schiffsleitung bereits eingesetzt. Die vorliegenden Informationen miteinander zu verschneiden und mit hoher Auflösung in engen Zeitintervallen an Bord eines Schiffes zur Anzeige zu bringen, stellt jedoch eine innovative Aufgabe und Herausforderung dar. Zu entwickeln sind neuartige Navigationsdienste für eine energiesparende und sichere Schifffahrt, die intelligente Systeme bei der Verkehrslenkung und -leitung unterstützen. Die neuartigen Dienste schaffen zudem, in Anlehnung an Fahrassistenzsysteme im Straßenverkehr, wichtige Voraussetzung für die Vision einer autonomen Schiffsleitung.

Im Rahmen des Modernitätsfonds des BMVI (mFUND) startete am 1. Juni 2017 das Projekt ImoNav (Integration von hochauflösten marinen Geodaten in elektronische Navigationssysteme). Im Fokus des Projektes steht ein hochauflöster Navigationsdienst für stark befahrene Seewasserstraßen wie die Elbe. Durch den neuen Geodatendienst soll insbesondere in engen und in Tiefgang beschränkten Gewässern mit hoher Verkehrsdichte (z. B. Ästuare Elbe und Weser) das Kollisions- und Strandungsrisiko reduziert werden. Das Projekt soll zudem zu einer Effizienzsteigerung bei der Schifffahrt führen, da präzise Wasserstands- und Strömungsprognosen eine Optimierung der Reiseplanung ermöglichen, wodurch sich Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen reduzieren lassen. Weiterhin werden die neuen Produkte Hafenbehörden und -dienstleister unterstützen, da eine verbesserte Reiseplanung mit genaueren Ankunfts- und Abfahrtszeiten die effiziente Planung von Einsatzkräften deutlich vereinfacht.

Die Entwicklung in ImoNav baut auf den Erfahrungen der heute zum Einsatz kommenden Informationssysteme für elektronische Seekarten (ECDIS) auf. Für die Realisierung der Projektziele ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Datenlieferanten und Entwicklern einer Infrastruktur für die Datenübermittlung und

Anzeige erforderlich, da die gesamte Prozesskette weiterentwickelt bzw. neu entstehen muss. An ImoNav sind deshalb neben dem BSH in seinen Kompetenzbereichen Datengewinnung und Standardisierung auch die Firmen smile consult GmbH und SevenCs GmbH in den Bereichen Softwareentwicklung und Automatisierung als Partner beteiligt.

2 Ziele von ImoNav

Das Ziel von ImoNav ist es, einen neuartigen Geodatendienst für hydrographische und ozeanographische Daten aufzubauen. Zu den Kernaufgaben des BSH gehört die Herstellung und Herausgabe der amtlichen Seekarten in Deutschland, wobei digitale Systeme und elektronische Seekarten (ENC) derzeit die klassischen Papierseekarten ablösen. Zudem betreibt das BSH meereskundliche Vorhersagedienste für eine Vielzahl von Nutzern und Kunden. Der Wasserstands- und Sturmflutwarndienst gibt viermal täglich Vorhersagen für die kommenden Wasserstände an der deutschen Nordseeküste und zweimal täglich Wasserstandsvorhersagen für die deutsche Ostseeküste heraus. Wichtige Grundlagen liefern hierfür die operationellen Vorhersagemodelle des BSH (Brüning et al. 2014) sowie ein statistisches Verfahren (Model Output Statistics, MOS), mit dem an ausgewählten Positionen Modellvorhersagen optimiert werden können (Müller-Navarra und Knüpffer 2010). In ImoNav sollen die Stärken beider Vorhersageverfahren genutzt und die qualitativ hochwertigen MOS-Daten mit flächenhaften Wasserstandsvorhersagen der operationellen Modelle verknüpft werden.

Parallel zur Optimierung der Wasserstandsinformationen ist es erforderlich, ein flächendeckendes und stets aktualisiertes Geländemodell auf Grundlage einer einheitlichen Datenbasis mit möglichst hoher Auflösung vorzuhalten. Die im BSH, bei der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV), den Ländern, Hafenämtern und -betreibern vorliegenden unterschiedlichen Vermessungsdatensätze bedürfen hierzu einer zeitintensiven Transformation und Aufbereitung. Infolge sich verbessernder Messsysteme und der Möglichkeit, große Datenmengen zu erheben, zu speichern und zu verarbeiten, steigt dieser Aufwand enorm. Durch Automatisierung der einzelnen Prozessschritte soll er weitestgehend minimiert werden, um in kurzen zeitlichen Abständen hochaufgelöste Bathymetriedaten in Form eines engmaschigen regulären Gitters erzeugen zu können.

Für eine sichere Navigation ist insbesondere die tatsächliche Wassertiefe, also die Verknüpfung von digitalen hochaufgelösten Bathymetriedaten mit aktuellen Wasserständen oder Wasserstandsvorhersagen von besonderem Interesse. Die optimierten Wasserstandsdaten sind deshalb mit den hochaufgelösten Bathymetriedaten verknüpft.

metriedaten zu verschneiden. Das auf diese Weise erzeugte Summenmodell ist die Grundlage für die dann abzuleitenden nautischen Produkte.

Die alphanumerische und/oder grafische Darstellung in ECDIS erfordert zusätzliche dynamische Layer, für die Datenspezifikationen erarbeitet werden müssen, die den IHO-Standards entsprechen. Weiterhin sind Konzepte für geeignete Kommunikationsverfahren zur zuverlässigen Übertragung der Daten zu entwickeln.

Am Ende des Projektes wird in einer mehrmonatigen Test- und Demonstrationsphase ein prä-operationeller Testbetrieb durchgeführt und die Projekt ergebnisse unter Einbeziehung von Nutzern evaluiert.

3 Erste Ergebnisse zur Integration hydrographischer und ozeanographischer Daten

Als Test- und Demonstrationsgebiet für ImoNav wurde das Elbeästuar zwischen Wedel und innerer Deutscher Bucht ausgewählt, da in diesem Bereich eine sehr gute Abdeckung mit hochauflösten aktuellen Bathymetriedaten und ozeanographischen Prognosen vorliegt (Abb. 1).

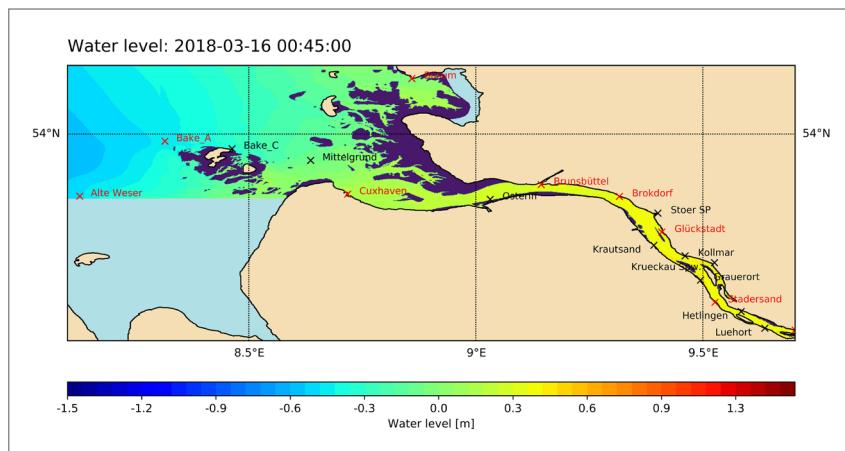


Abb. 1: Momentaufnahme prognostizierter Wasserstände im Testgebiet „Elbeästuar“

Die im Folgenden dargestellten ersten Ergebnisse beschränken sich ausschließlich auf die Arbeitspakete „Bathymetrische Daten“ und „Ozeanographische Daten“. Da sich das Projekt noch in der Start- und Anfangsphase befindet, sind sie teilweise noch als vorläufig zu bezeichnen.

Die bathymetrischen Daten werden in Form eines durchgehenden Grid-basierten Geländemodells aufbereitet. Um die für die Erstellung des Modells erforderlichen Vermessungsdaten und Metadaten strukturiert, nachvollziehbar und vor allem konsistent abzulegen, wurde ein Datenbankmodell entwickelt, das die Anforderungen für die Zusammenführung der Daten zu einem Geländemodell aber auch zur Weiterverarbeitung von Produkten für Navigationszwecke erfüllt.

Entsprechend der gesetzlichen Festlegungen ist die Verkehrssicherungspflicht, zu der auch die Gewässervermessung zählt, auf verschiedene Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter (WSÄs), das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und die Hafenämter aufgeteilt. Alle beteiligten WSÄs und das BSH sind dazu angehalten ihre Peildaten kontinuierlich in das 3D-Datenarchiv der WSV einzustellen. Zu diesem Archiv wurde eine Schnittstelle für Metadaten und Vermessungsdaten eingerichtet, die für den automatischen Datenzugriff genutzt wird.

Bei den für das Erstellen eines durchgehenden Bathymetriemodells zusammengetragenen Peildaten handelt es sich um Vermessungen mit unterschiedlichen Aufnahmeverfahren, Lagebezugssystemen und Bodenauflösungen. Sofern die Daten aufgrund des Aufnahmeverfahrens nicht in einer Grid-Form vorlagen, musste hier eine Modellierung durchgeführt werden, bevor sie zusammen mit den Metadaten in der Datenbank abgelegt werden konnten. Die gesamte Weiterverarbeitung zum Geländemodell findet innerhalb der Datenbank statt. Dadurch ist die Konsistenz zwischen Meta- und Vermessungsdaten bei der Modellerstellung gewährleistet. Die Verschneidung aller Datensätze erfolgte automatisiert nach dem jeweils jüngsten Vermessungsdatum (Abb. 2). Somit wird sichergestellt, dass ältere Vermessungen von neueren überdeckt werden.

Für eine künftige automatisierte Aktualisierung des Datenbestandes wurde im ersten Schritt ein programmgesteuerter Abgleich der Metadaten zwischen dem 3D-Datenarchiv und dem vorhandenen Datenbestand entwickelt. Zusätzlich zu dem berechneten Modell wurde ein überlappungsfreier Metadatensatz als GML erstellt, der Aufschluss über den Vermessungszeitpunkt, das Aufnahmeverfahren und den Lieferanten der Vermessung enthält.

Damit eine gute Performance bei der Berechnung, Weiterverarbeitung und Weitergabe des Geländemodells gewahrt bleibt, wurde ein Kachelschema erarbeitet und als GML bereitgestellt (Abb. 3). Dieses Schema soll auch als Grundlage für die Datenweitergabe im IHO-Standard S-102 dienen.

Neben der Entwicklung eines weitgehend automatisierten Arbeitsablaufs findet auch gleichzeitig eine Mitarbeit an der Weiterentwicklung des internationalen S-102 Standards statt. Für eine geforderte Ausgabe der Daten mit dem Höhenbezug Seekartennull (SKN) wurde eine technische Lösung bezüglich des SKN-Modells geschaffen.



Abb. 2:
Bathymetriemodell
des Testgebiets

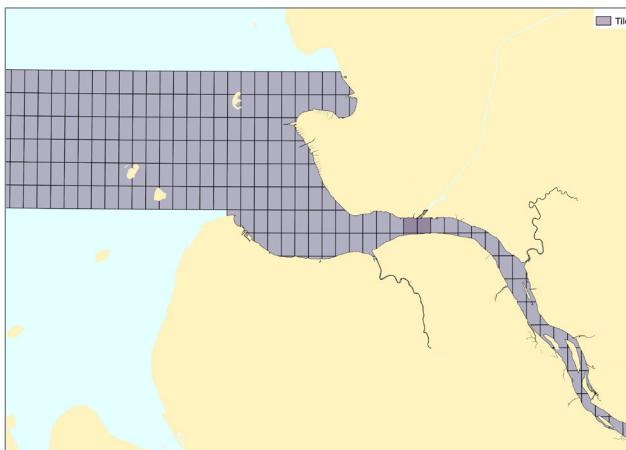


Abb. 3:
Kachelschema

Im Rahmen von ImoNav werden zudem hochauflöste ozeanographische Daten benötigt. Da die tatsächliche Wassertiefe für eine sichere Navigation von zentraler Bedeutung ist und diese von aktuellen Wasserständen abhängt, ist die Genauigkeit der Wasserstandsvorhersage ein entscheidender Faktor. Um den Vorhersagefehler in diesem Bereich zu minimieren, werden hierfür die operationellen Vorhersagemodelle des BSH (Brüning et al. 2014), mit denen flächenhafte Wasserstandsprednosen bis zu einer Woche im Voraus berechnet werden können, sowie das MOS-Verfahren, mit dem an ausgewählten Positionen Modellvorhersagen optimiert werden können (Müller-Navarra und Knüpffer 2010), verknüpft. So können die Vorteile der jeweiligen Verfahren genutzt werden, um eine insgesamt genauere Vorhersage zu erhalten. Als Vorteile seitens des Modells

gelten zum Beispiel eine hohe relative Genauigkeit, eine sehr gute Darstellung von Extremereignissen und die Berechnung kontinuierlicher Wasserstandsflächen. Beim MOS-Verfahren werden für einzelne Standorte, an denen Beobachtungsdaten vorliegen, numerische Modellprognosen mittels einer multiplen linearen Regression an Beobachtungsdaten adaptiert, wodurch der Vorhersagefehler reduziert und die Aktualität erhöht werden. An den Standorten werden ortsspezifische Besonderheiten berücksichtigt und mögliche systematische Fehler in der numerischen Modellprognose korrigiert. Idealerweise würde man das Verfahren für alle Punkte der betrachteten Fläche anwenden, was allerdings aufgrund der Datenlage nicht möglich ist, da nur für wenige Punkte Beobachtungszeitreihen vorliegen. Daher ist eine andere Herangehensweise nötig.

Unter der Annahme, dass die Optimierung der Modellprognosen durch MOS nicht nur auf einen Punkt beschränkt ist, sondern auch für die nähere Umgebung gilt, kann eine weitere Verbesserung durch räumliche Interpolation erreicht werden. Für eine Korrektur von flächenhaften Modellprognosen werden zunächst an den MOS-Vorhersagepunkten für jeden Vorhersagezeitschritt Differenzen zwischen MOS-Vorhersage und Modellvorhersage berechnet und diese Differenzen dann zeitschrittweise räumlich interpoliert. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Interpolationstechniken („linear“, „cubic spline“, „nearest neighbour“ und „inverse distance weighting“) auf eine Eignung untersucht. Dabei hat sich herausgestellt, dass das „Inverse Distanzwichtungs-Verfahren“ (IDW) die beste Methode darstellt, da es eine stufenfreie Fläche mit den geringssten Fehlern in einer ersten Validierung liefert. Das IDW-Verfahren gewichtet den Einfluss eines Korrekturwertes anhand der Entfernung, wobei der Einfluss proportional zur Entfernung zum betrachteten Wert abnimmt. Das Ergebnis der Interpolation ist nun eine Korrekturfläche, die auf die ursprüngliche numerische Modellfläche angewendet werden kann. Subtrahiert man die Korrekturfläche von der numerischen Wasserstandsfläche, erhält man eine neue verbesserte Wasserstandsfläche (Abb. 1).

Das Verbesserungspotenzial der kombinierten Methode in Bezug auf die ursprüngliche Wasserstandsfläche des numerischen Modells ist Gegenstand aktueller Untersuchungen und bedarf einer langfristigen Validierung. Die Validierung mit Beobachtungsdaten umfasst eine Analyse wichtiger statistischer Größen wie Standardabweichung, RMSE sowie BIAS und ermöglicht einen Vergleich mit dem Referenzverfahren (numerisches Modell ohne Korrektur). Die Fehlerberechnung dient ferner der Bestimmung von Unsicherheiten in der Vorhersage. Ziel ist es, Nutzern neben der Vorhersage des Wasserstands auch Informationen zur Vorhersageunsicherheit bereitzustellen.

Zur Validierung werden verschiedene Pegelstandorte herangezogen, die nicht im Verfahren verwendet wurden, im Testgebiet liegen und über Pegelonline (www.pegelonline.wsv.de) frei verfügbar sind. Abb. 4 zeigt einen Ver-

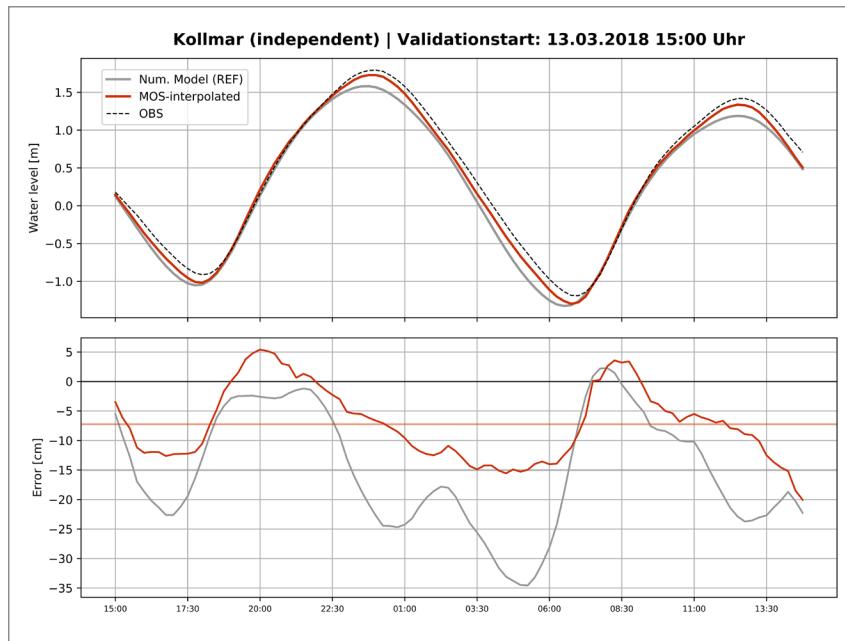


Abb. 4: Vergleich von Wasserstandsvorhersagen mit Beobachtungsdaten am unabhängigen Pegel Kollmar

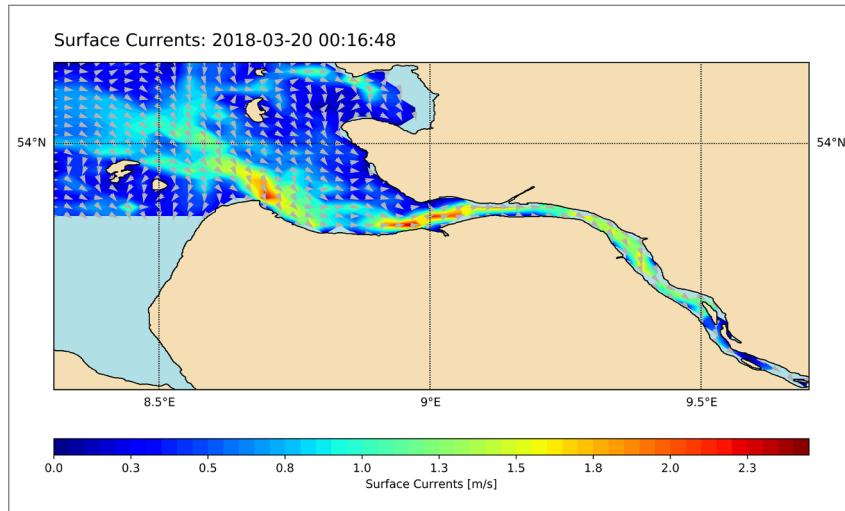


Abb. 5: Momentaufnahme prognostizierter Strömungen im Elbeästuar

gleich von Wasserstandsvorhersagen mit Beobachtungsdaten am unabhängigen Pegel Kollmar. Im oberen Teil der Abbildung ist eine 24-Stunden-Vorhersage des Referenzverfahrens (grau) sowie des neuen Verfahrens (rot) gegenüber den Beobachtungen des Wasserstands in Kollmar dargestellt. Im unteren Teil sind die Abweichungen der Vorhersage von der Beobachtung dargestellt. Durch das Korrekturverfahren konnten die Abweichungen zu den Messdaten im Vergleich zum Referenzdatensatz der unkorrigierten Modellprognosen deutlich reduziert werden.

Für die Schifffahrt sind neben dem Wasserstand noch weitere ozeanographische Daten von Interesse. Daher wurden erste Testdatensätze für Strömungen erzeugt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt (Abb. 5). Im Laufe des Projekts werden dann noch weitere Parameter (z. B. Temperatur oder Salzgehalt) bearbeitet und alle Arbeitsabläufe für eine kontinuierliche Datenlieferung operationalisiert. Alle Daten sollen dabei in einem standardisierten, IHO-konformen Format bereitgestellt werden, so dass sie in elektronische Seekarten-informationssysteme integriert werden können.

Dank

Das Projekt ImoNav wird als Verbundvorhaben im Rahmen der Förderrichtlinie „mFUND“ des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) gefördert.

Literatur

- Brüning, T., Janssen, F.; Kleine, E.; Komo, H.; Maßmann, S.; Menzenhauer-Schumacher, I.; Jandt, S.; Dick, S. (2014): Operational ocean forecasting for German coastal waters. Die Küste, 273–290.
- Müller-Navarra, S. H.; Knüpffer, K. (2010): Improvement of water level forecasts for tidal harbours by means of model output statistics (MOS). Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie, Bericht 47, 19 S.

Kontakt

Stephan Dick

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

Bernhard-Nocht-Straße 78, 20359 Hamburg

stephan.dick@bsh.de

Stören und Täuschen von GNSS – Praxisbeispiele und deren Folgen

Alexander Rügamer

1 Einführung

Globale Satellitennavigationssysteme (GNSS), wie das amerikanische GPS, das russische GLONASS, das chinesische BeiDou oder das europäische Galileo, sind zu einem elementaren Bestandteil von Schifffahrt sowie Hydrographie geworden: Satellitennavigation wird traditionell für Aufgaben im Hochsee- und Küstenbereich als eine immer verfügbare und genaue Navigationsquelle eingesetzt. Ebenso spielt die Satellitennavigation für Lagewinkelbestimmungen des Schiffes, für zukünftige autonome Schiffsvehikel sowie für den Trend zu immer mehr unbemannten Messsystemen eine zunehmend wichtigere Rolle. Generell gilt (Hoppé 2017), je größer das Schiff ist und je schneller es sich bewegt, desto höher sind auch dessen Anforderungen an eine genaue, verlässliche und möglichst immer verfügbare Positions-, Geschwindigkeits-, und Zeitinformation (engl. Position, Velocity, Time – PVT).

Je größer jedoch die Abhängigkeit von GNSS ist, desto größer wird auch die Gefahr von Störungen und Täuschungen. Bisher wird sich meist auf ungeschützte offene, sog. Open Service (OS) GNSS-Signale verlassen, welche zwar weltweit und kostenfrei verfügbar sind, allerdings nie für den sicherheitskritischen Einsatzzweck entwickelt wurden. Trotzdem wird diese GNSS-basierte PVT-Information als ein vertrauenswürdiger Sensor in der Schifffahrt und Hydrographie eingesetzt, genauso wie mit der ungeschützten GPS-Zeit Energienetze geregelt, Mobilfunkstationen synchronisiert oder Banken und Börsen danach ausgerichtet werden.

In diesem Artikel werden anhand von Vorfällen aus der Praxis Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt und Empfehlungen abgeleitet, die schlussendlich zu einer sichereren Verwendung des GNSS-Sensors führen sollen.

2 Vorfälle in der Praxis

2.1 GNSS-Störer

Generell wird zwischen unabsichtlichen und absichtlichen GNSS-Störern, sog. „Jammern“, unterschieden. Beide Arten von Störern führen jedoch dazu, dass die auf der Erde mit einer extrem geringen Leistung ankommenden GNSS-Signale (ca. -130 dBm, also 0.1 femtoWatt) durch Störer mit Leistungen oftmals im 1 bis 10 Watt Bereich so unterdrückt werden, dass die GNSS-Signale nicht mehr verarbeitet werden können.

Unabsichtliche Störungen entstehen z. B. durch fehlerhafte Elektronik (z. B. Oberwellen von Radioempfängern) oder unlizenziertem Funkbetrieb auf den GNSS-Frequenzbändern (Wim de Wilde 2016). Ebenso gibt es Störer wie Radarsysteme oder Amateurfunk, welche lizenzerrechtlich auf den GNSS-Bändern betrieben werden dürfen.

Die eigentliche Gefahr geht jedoch von absichtlichen Störern aus, wobei hier auf militärische Störer nicht weiter eingegangen wird. Kommerziell sind sog. „Privacy“ oder „Personal Protection Devices“ (PPDs) für unter 100 Euro



Abb. 1:
Drei kommerzielle
GNSS-Jammer, erwor-
ben durch das Fraun-
hofer IIS

über die gängigen Online-Einkaufsplattformen verfügbar, welche als Ausrüstung zum Schutz der Privatsphäre verkauft werden. Obwohl ihr Verkauf legal (siehe Abb. 1), ihre Verwendung jedoch illegal ist, gibt es zahlreiche Vorfälle, die zeigen, dass diese Geräte trotzdem ihren Einsatz finden: Ob sie nun dazu verwendet werden, die Privatsphäre von Paketzustellern vor ihren Arbeitgebern zu schützen, „Pay-as-you-Drive“-Autoversicherungsmodelle zu umgehen oder aktiv zum Diebstahl von GPS-geschützten Gerätschaften verwendet werden – Messkampagnen in Deutschland und Europa haben gezeigt, dass solche Jammer Verwendung finden (STRIKE3 2018).

Die naheliegende Annahme, dass ein GNSS-Empfänger im Störfall keine Position mehr ausgibt, ist ein Trugschluss. Das Verhalten von vielen Empfängern in der Nähe von Jammern ist oft nicht vorhersehbar, wie z. B. eine Testkampagne von Grant et al. (2009) ergeben hat: Hier wurde ein GPS-Jammer vor der Küste Englands aktiviert und die Reaktionen von sowohl Schiffs- als auch DGPS-Empfängern an Land beobachtet. Bei einigen Empfängern auf dem einem Schiff driftete die gemeldete GPS-Position zunächst massiv ab; nicht alle getesteten Empfänger zeigten dabei einen ausreichenden Alarm/Fehlerzustand.

Seo und Kim (2013) berichteten, dass 2012 innerhalb von 16 Tagen 1016 Flugzeuge und 254 Schiffe direkt durch Jamming aus Nordkorea beeinflusst wurden. Die Situation scheint sich kaum verbessert zu haben: Im Artikel Popular Mechanics (2016) wird berichtet, dass noch im Jahr 2016 in insgesamt 962 Fällen kommerzielle Flugzeuge sowie in fast 700 Fällen Fischereischiffe vor der Küste Koreas massiv durch Jamming aus dem Norden gestört wurden. Dies zeigt, dass Jamming ein globales Problem ist.

2.2 GNSS-Täuscher

Während GNSS-Störer den Einsatz von GNSS-Empfängern prinzipiell nur blockieren, verfolgen Täuscher (sog. „Spoofers“) das Ziel möglichst unbemerkt die Position- und Zeitinformation am angegriffenen Empfänger zu verändern. Damit stellt ein GNSS-Täuscher eine potenziell sehr viel größere Gefahr dar als ein GNSS-Störer.

2.2.1 Angriffe auf das PVT-Ausgangssignal

Die einfachste Art des Täuschens einer PVT-Information funktioniert, indem nicht das GNSS-Signal angegriffen, sondern die GNSS-Empfänger-Ausgabe manipuliert wird. Für Smartphones gibt es diverse GPS-Täuscher-Apps, welche eine beliebige PVT-Information innerhalb des Smartphone-Betriebssystems generieren und so anderen Apps wiederum einen falschen Ort/Zeit vorgaukeln. Die Gegenmaßnahmen dazu sind die Einbeziehung zusätzlicher Sensoren wie Funkzellenortung und WiFi.

Falls GNSS-Module oder -Empfänger zum Einsatz kommen, kann die Ausgabe-Schnittstelle angegriffen werden: Oft wird hier ein serielles Protokoll mit NMEA-Ausgabe genutzt. Es bedarf nur wenig Bastelsachverstand um diese Schnittstelle mit Protokoll durch einen externen Mikrocontroller beliebig, ggf. auch funkgesteuert, zu manipulieren. So berichtet z. B. Windward (2014) von zunehmenden Fällen, bei denen die GPS-Position im in der Schifffahrt eingesetzten AIS (Automatisches Identifikationssystem) gefälscht wurde. Diese Angriffe kommen meist jedoch „von innen“, um Überwachungsmaßnahmen

z. B. gegen illegalen Fischfang ausschalten zu können, und sind demnach nur schwer oder gar nicht von außen zu entdecken oder zu verhindern.

2.2.2 GNSS-Repeater

Um das GNSS-Signal selbst anzugreifen, ist die einfachste Art des Täuschens ein sog. „Repeater“, welcher das GNSS-Signal empfängt und – mit einer kurzen Verzögerung – wieder abspielt. Dieser Angriff wird auch als „Meaconing“ bezeichnet. Damit ist es allerdings kaum möglich, eine beliebige Zeit/Position am angegriffenen Gerät zu erzeugen.

Hin und wieder gibt es Fälle, bei denen Fehlfunktionen an Repeater-Installationen zu einem ungewollten „Spoofing“-Angriff führen: Dunkel (2011) beschreibt z. B. einen Vorfall in einem Flugzeug-Hangar in Deutschland. Dort wurde ein GPS-Repeater eingesetzt, um das GNSS-Signal innerhalb des Hangars verwenden zu können; allerdings war die Sendeleistung zu hoch eingestellt. Dadurch entstanden außerhalb des Installationsbereiches unabsichtliche Spoofing-Erscheinungen.

Weitere Beispiele zeigen, dass solche Repeater aber auch absichtlich zum Täuschen des GNSS-Empfängers eingesetzt werden: Die Süddeutsche Zeitung (2016) berichtete in einem Artikel, dass innerhalb Moskaus die GPS-Position immer wieder zum Moskauer Flughafen Wnukowo wandert. Eine direkte Erklärung dafür wird nicht gegeben, jedoch deutet einiges stark auf genau solch einen Repeater-Einsatz hin. Als mögliche Motivation wird der Schutz vor GPS-gesteuerten Drohnen angegeben.

Die Maritime Executive (2017) berichtete über ein mehrere Tage anhaltendes Spoofing im Schwarzen Meer im Juni 2017. Über 20 betroffene Schiffe wurden plötzlich „auf Land“, ca. 25 nautische Meilen entfernt von ihrem eigentlichen Ort, angegeben. Dem Artikel zufolge zeigten die Schiffs-GPS-Systeme die Landposition mit einer Genauigkeit/Verlässlichkeit von kleiner 100 Meter an. Auch hier wurde von den verwendeten Systemen kein Alarm ausgelöst.

2.2.3 GNSS-Spoofing

In den Jahren 2012 und 2013 führte die University of Austin, Texas, unter der Leitung von Prof. Todd Humphrys diverse Demonstrationen von Spoofing-Angriffen auf Drohnen und insbesondere Schiffe durch (UTNews 2013). Mit einem am Lehrstuhl für etwa 3000 US-Dollar selbstgebauten Spoofing-Gerät (Humphreys et al. 2008) konnte eine 80 Millionen Euro teure Yacht im Mittelmeer, welche per GPS-gesteuertem Autopilot einen geraden Kurs fuhr, durch Spoofing des Signals auf einen Zick-Zack-Kurs gelenkt werden. Ein Alarm oder sonstige Hinweise auf Unregelmäßigkeiten wurden nicht ausgelöst. Diese gezielten

Spoofing-Angriffe sind jedoch schwer durchzuführen, falls sie unentdeckt bleiben sollen. Bei den genannten Demonstrationen befanden sich die Angreifer in der Nähe und hatten genaue Informationen, wo sich der anzugreifende GPS-Empfänger befand. Erst mit dieser Information konnte ein gezieltes, nur für diesen Empfänger gültiges Spoofing-Signal generiert werden, um den Angriff durchzuführen.

Mittlerweile sind jedoch sowohl GPS-Simulatoren als Open-Source-Software als auch günstige, universelle, software-defined-radio (SDR) Hardware verfügbar (siehe Abb. 2). Mit der Motivation beim Augmented-Reality-Spiel „Pokémon Go“ zu schummeln, gibt es mittlerweile diverse Schritt-für-Schritt-Anleitungen

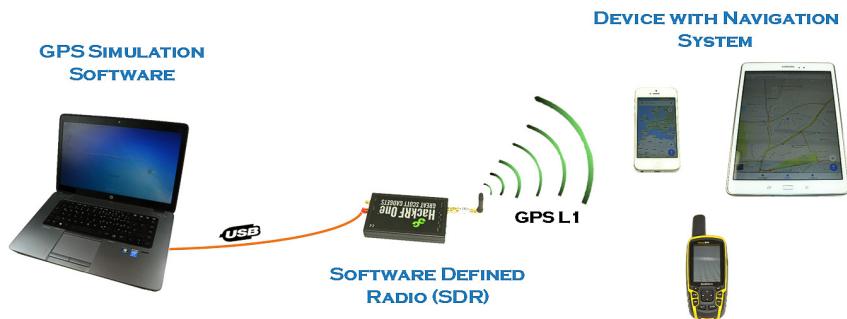


Abb. 2: Günstiger GPS-Spoofing-Aufbau

im Internet und auf YouTube, wie auch ein technischer Laie solch einen Spoofing einsetzen kann. Während beim Uni Austin-Spoofing das gefälschte Signal konsistent zum Originalsignal dem Empfänger untergeschoben wird bevor der Angriff startet, sendet der günstige Spoofing einfache ein Signal mit höherer Sendeleistung und wartet darauf, dass der angegriffene Empfänger auf das Spoofing-Signal überspringt. Der große Unterschied zur Spoofing-Demonstration der Uni Austin ist jedoch die einfache Detektierbarkeit des „günstigen“ Spoofing-Angriffs: Hier „springt“ plötzlich die Position/Zeit abrupt auf einen neuen Wert, was eigentlich trivial als Angriff zu erkennen ist. Jedoch ist noch lange nicht gesagt, dass dies die Empfänger als Angriff ansehen. So lässt sich beispielsweise ein Apple iPhone 5 Smartphone relativ problemlos mit solch einem primitiven Spoofing beliebige Orte und Zeiten vortäuschen.

Je mehr Anwendungen sich insbesondere für kommerzielle Dienstleistungen auf GNSS-Positionen und -Zeiten verlassen, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass es in wenigen Jahren frei verfügbare intelligente Spoofing geben wird. Technisch gibt es hier keine Hindernisse, es ist nur eine Frage der Motivation.

3 Lösungsvorschläge für Schutzmechanismen

3.1 Bewusstsein beim Anwender schaffen

Der vielleicht wichtigste Lösungsvorschlag für einen Schutzmechanismus ist, eine gewisse Sensibilität und Bewusstsein beim Anwender hervorzurufen, einem ungeschützten GNSS-Signal (wie GPS L1 C/A) grundsätzlich nicht blind zu vertrauen. So wie es mittlerweile Straßenschilder gibt, die den Navi-Nutzer darauf hinweisen, dass er einer bestimmten Straße nicht folgen dürfe, obwohl es das Auto-Navi sagt und sich im englischsprachigen Raum sogar der umgangssprachliche Begriff „Death by GPS“ eingebürgert hat (Lin et al. 2017), müssen insbesondere professionelle Anwender gezielt geschult werden, die GNSS-PVT-Ausgaben kritisch zu prüfen bzw. zu hinterfragen.

3.2 Konsistenzprüfung im Empfänger

Die GNSS-Empfänger-Hersteller könnten viel dafür tun ihren Anwendern Möglichkeiten zu geben nicht-reguläre GNSS-Bedingungen zu erkennen und zu deuten: In Rügamer und Kowalewski (2015) sind typische Gegenmaßnahmen auf Empfänger-Firmware-Seite genannt, welche zumindest die Detektion von Störern und Täusichern relativ gut ermöglichen, indem z. B. Empfängerparameter wie Signal-Rauschabstand, Code- und Trägerphasenmessungen sowie Doppler-Werte kontinuierlich auf Konsistenz geprüft werden. Generell muss gelten: Besser gar keine PVT-Ausgabe, als eine falsche. Und falls eine Konsistenzprüfung fehlschlägt, sollte der Anwender darüber informiert werden. In den oben beschriebenen Beispielen fehlten solche Alarme jedoch gänzlich.

3.3 Absicherung der Empfängerschnittstellen

Wie in Kap. 3.2 gezeigt, kann ein GNSS-Sensor konsistent funktionieren, und trotzdem wird ein Angriff durch Manipulation der Sensorausgabe bei den meisten Geräten trivial durchführbar sein. Wie auch das offene GPS L1 C/A-Signal wurde der häufig als Ausgabe genutzte NMEA-Standard über eine einfache serielle Schnittstelle nie für sichere und manipulationsgeschützte Anwendungsfälle geschaffen. Des Weiteren stammt der NMEA-Standard aus einer Zeit, in der man sich generell kaum Gedanken über Cyber-Angriffsszenarien machte.

Das NMEA-Protokoll über eine serielle Schnittstelle bietet hier keine Möglichkeiten der Sicherheit. Proprietäre Erweiterungen der Hersteller haben jedoch das Problem erkannt und aufgegriffen: So bietet beispielsweise das uBlox-Binärprotokoll ab den uBlox 8-Serienmodulen eine Signierung des Ausgabeprotokolls an, siehe uBlox (2017). Richtig angewendet bietet dies bereits schon einen sehr

guten Schutz, um mögliche Angriffe auf der Schnittstellenebene zu detektieren und zu verhindern.

3.4 Signierung der Navigationsnachricht

Das Spoofing von GPS L1 C/A und anderen offenen GNSS-Signalen ist nur deshalb möglich, weil die komplette Spezifikation der Signalerzeugung frei verfügbar ist und insbesondere keine Signierung der Navigationsnachricht verwendet wird. Eine kryptographische Signierung würde hingegen z. B. mit einem Public Key Infrastructure (PKI) System sicherstellen, dass der Nutzerempfänger die empfangene Navigationsnachricht authentifizieren kann. D.h. der Nutzer könnte sich nach erfolgreicher Authentifizierung sicher sein, dass das Signal zumindest vom GNSS-Betreiber erzeugt und versendet wurde.

Die Signierung von GNSS-Signalen wird seit vielen Jahren in der Literatur diskutiert und ist z. B. auch für das in einigen Jahren erwartete erneuerte GPS L1C vorgesehen (O'Driscoll 2018). Auch das europäische System Galileo kann damit aufwarten: Aufgrund der Redefinition des Safety-of-Life-Dienstes von Galileo nach EGNOS waren plötzlich in der Galileo E1B Nachricht Symbole frei. Dies ermöglicht nun, dass Galileo E1B das erste System sein wird, welches mit OSNMA (Open Service Navigation Message Authentication) solch eine Signierung der Navigationsnachricht ab 2019 umsetzen wird. Im Empfänger sind hierfür lediglich Anpassungen der Firmware notwendig.

Signierungen wie OSNMA sind ein sehr effektiver Schutz gegen einfache Spoofers, die auf Signalsimulatoren basieren, auch wenn die Time-to-First-Authenticated-Fix (TTFAF), je nach eingesetzter Parametrisierung des Systems, einige Sekunden dauern kann (Hernández 2018).

Gegen Replayer-Angriffe kann jedoch eine Authentifizierung der Nachricht allein kaum etwas ausrichten, da ein Replayer ebenfalls die authentische Nachricht sendet, allerdings verzögert bzw. von einer anderen Position. Eine Kombination zwischen der Überwachung der GNSS-Empfänger-Rohdaten-Konsistenz zusammen mit der Authentifizierung sollte dagegen zumindest einen sehr guten Grundschutz bieten.

3.5 Kryptographisch erzeugte Spreizcode-Sequenzen

Die höchste Sicherheit und zugleich eine sofortige Authentifizierung bieten kryptographisch erzeugte Spreizcode-Sequenzen (engl. spreading code encryption). Durch Korrelation des sehr schwachen Empfangssignals mit einem im Empfänger erzeugten Spreizcode-Replikas entsteht ein Signal-zu-Rausch-Gewinn, welcher die Grundlage für das bei GNSS eingesetzte CDMA (Code Division Multiple Access) Multiplexverfahren bildet. Bei freien OS-Signalen sind die

Spreizcode-Sequenzen bekannt und wiederholen sich nach wenigen Millisekunden. Das vereinfacht die Empfängerimplementierung, bietet damit allerdings auch Möglichkeiten, Täuscher-Systeme zu entwickeln.

Mit Hilfe von kryptographisch erzeugten und sich nicht wiederholenden Spreizcode-Sequenzen wird das Signal effektiv gegen Täuscher geschützt: Um die Sequenzen in einem Täuscher zu erzeugen, würden die nicht frei verfügbaren Algorithmen und zusätzlich noch entsprechende Initialisierungsvektoren, die sog. Schlüssel, benötigt.

Bis vor wenigen Jahren wurden GNSS-Signale mit solchen kryptographisch erzeugten Spreizcode-Sequenzen nur bei militärischen Signalen, etwa dem GPS P(Y), eingesetzt. Das zivile europäische GNSS Galileo bietet mit dem „Public Regulated Service“ (PRS) ebenfalls solch ein besonders geschütztes Signal, das speziell für autorisierte Nutzer wie Behörden und hoheitliche Organisationen sowie für kritische Infrastruktur zur Verfügung steht. PRS nutzt spezielle Modulationen um gegenüber Störern robuster zu sein und kryptographische Verfahren um eine Täuschung unmöglich zu machen. Allerdings werden solche PRS-Empfänger nicht für beliebige, sondern nur für hoheitlich autorisierte Anwendungen zur Verfügung stehen.

Um auch für kommerzielle Anwendungen eine sehr hohe Sicherheit gegenüber Täuschen zu haben soll für den Galileo E6C Commercial Service (CS) mit der „CS Signal Authentication“ ebenfalls eine kryptographisch erzeugte Spreizcode-Sequenz kostenpflichtig angeboten und ab 2020 realisiert werden (Hernández 2018).

Für die Generierung der kryptographisch geschützten Spreizcodes mit einem Schlüssel sind Empfänger mit Sicherheitsmodulen notwendig. Diese Sicherheitsmodule müssen gegen Angriffe von außen geschützt sein, damit die implementierten Algorithmen sowie gespeicherten Schlüssel nicht ausgelesen werden können. Um diesen Schutz zu gewährleisten sind einige technisch recht anspruchsvolle Verfahren notwendig, welche typischerweise erst durch eine Sicherheitsevaluierung bestätigt werden müssen, bevor ein solches Sicherheitsmodul eine Zertifizierung und damit Erlaubnis für den Einsatz bekommt (Rügamer et al. 2011).

3.6 Multi-Antennen Array-Signalverarbeitung

Um möglichst gegenüber absichtlichen Störern robust zu sein, können mehrere zusammengeschaltete Antennen mit entsprechender Array-Signalverarbeitung eingesetzt werden. Damit können Störer räumlich ausgeblendet und der Ursprungsort der empfangenen Signale geschätzt werden. Mit Nullsteuerungsalgorithmen (engl. nullsteering) und Strahlungsformung (engl. beamforming) stehen sehr mächtige Methoden zur Verfügung um Störer zu detektieren und

teilweise gleichzeitig massiv zu verringern. Jedoch steigen dadurch die Komplexität, der Aufwand und damit auch Kosten solcher Empfänger massiv an, weshalb diese Empfänger nur in sehr speziellen Anwendungsbereichen (z. B. besondere Referenzstationen oder militärische Einsatzgebiete) zum Einsatz kommen.

3.7 Fusion mit anderen Sensoren

Die Robustheit der Position- und Zeitinformation lässt sich weiterhin durch eine Fusion mit unabhängigen Sensoren verbessern. Inertialsensorik kann nicht gezielt gestört werden und bietet damit einen sehr guten komplementären Sensor zu GNSS. Auch neuere Entwicklungen im Bereich von Zeitgebern, wie Chip Scale Atomic Clocks (CSAC), können über einen langen Zeitraum eine sichere, unabhängige und präzise Zeitinformation liefern, welche zur Konsistenzprüfung der GNSS-PVT verwendet werden kann.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Wie in den vorangegangenen Kapiteln kurz dargestellt, ist die Gefahr von Störern und Täuschen durchaus gegeben. Während solche Interferenzen noch vor 15 Jahren kein Thema in der zivilen GNSS-Welt waren, nimmt die Anzahl von Vorfällen, vor allem im Bereich von absichtlichen Störungen und neuerdings auch Täuschungen, stetig zu. Trotzdem ist das gezielte Täuschen von GNSS nicht trivial: Es ist einfach, abrupt eine neue Position-/Zeitinformation zu senden, genauso einfach ist auch dessen Detektion. Ein unbemerktes Täuschen ist aufwändig und nur sehr zielgerichtet möglich, wie es z. B. in Van der Merwe et al. (2018) näher erläutert wird.

Dem gegenüber stehen lange Lebenszyklen von professionellen und z. B. für die Schifffahrt zertifizierten Empfängern. Daraus ergibt sich eine gewisse Gefahr, da veraltete Empfänger der neuen Bedrohung durch Störer und Täuscher nichts entgegensetzen können.

Andererseits hat in erster Linie die zivile wissenschaftliche Gemeinschaft in den letzten Jahren, viele durchaus praktische, Methoden aufgezeigt, mit denen schon mit relativ geringem Aufwand in der Empfängersignalverarbeitung zumindest eine Grundfestigkeit gegenüber Störern und Täuschen sowie deren Detektion ermöglicht werden. Durch das europäische Galileo GNSS sind nun erstmal auch kryptographisch abgesicherte Signale zivil verfügbar, welche die Sicherheit vor allem gegenüber Täuschen massiv erhöhen können.

Abb. 3 versucht grob den Aufwand der in Kap. 3 „Lösungsvorschläge für Schutzmechanismen“ beschriebenen Methoden gegenüber der erzielbaren Sicherheit darzustellen. Selbst einfache Konsistenzprüfungen im Empfänger

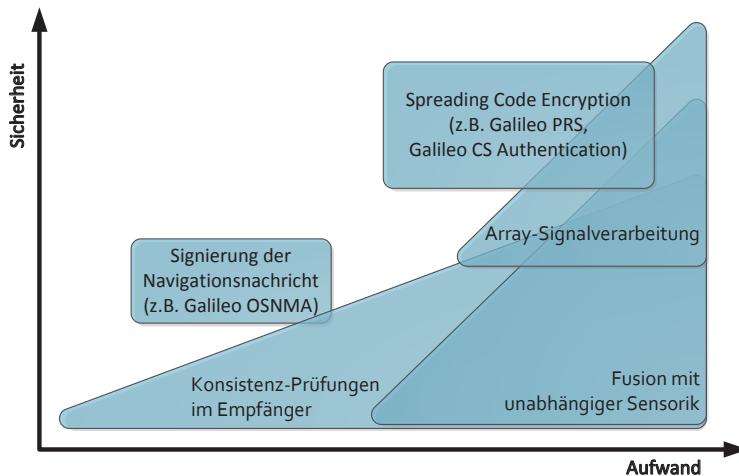


Abb. 3:
Verhältnis von
Aufwand
zur Sicherheit von
verschiedenen
GNSS-Härtungsmaß-
nahmen

können viel bewirken. Die in Galileo angekündigte Signierung der Navigationsnachricht ist nicht besonders aufwändig in ihrer Umsetzung und kann bereits eine gewisse Sicherheit gegen einfache Täuscher bieten. Wesentlich aufwändiger – jedoch auch sicherer – wird es mit dem Einsatz von kryptographisch erzeugten Spreizcodes, welche allerdings spezielle Empfänger mit Sicherheitsmodulen benötigen. All diese Techniken können durch eine Mehr-Antennen Array-Signalverarbeitung sowie Sensorfusion unterstützt werden.

Letztendlich bietet eine gut abgestimmte Kombination der verschiedenen Härtungsalternativen, zielgerichtet für die jeweilige Aufgabe, den besten Schutz. Dies und die Verknüpfung mit weiteren Konsistenzprüfungen der GNSS-PVT mit anderen, unabhängigen Sensoren erlaubt den sicheren und, in Zukunft, auch mehr und mehr autonomen Einsatz der Navigationslösung – trotz Störern und Täuschen.

Literatur

- De Wilde, W.; Cuypers, G.; Sleewaegen, J.-M.; Deurloo, R.; Bougard, B. (2016): GNSS Interference in Unmanned Aerial Systems. In: Proceedings of the ION GNSS 2016.
- Dunkel, W.; Weber, O.; Butsch, F. (2011): GNSS Interference Detection with GIMOS. In: 11th International GBAS Working Group Meeting (I-GWG-11), Osaka, Japan, February 24, 2011.
- Grant, A.; Williams, P.; Ward, N.; Basker, S. (2009): GPS Jamming and the Impact on Maritime Navigation. In: Journal of Navigation, 62(2), 173–187. DOI: [10.1017/S0373463308005213](https://doi.org/10.1017/S0373463308005213).

- Hernández, I. F. (2018): Galileo Authentication Services. In: Munich Satellite Navigation Summit 2018, 7th of March 2018.
- Hoppe, M. (2017): GNSS-Anwendungen in der Schifffahrt. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe, Band 87, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Humphreys, T. E.; Ledvina, B. M.; Psiaki, M. L.; O'Hanlon, B. W.; Kintner Jr., P. M. (2008): Assessing the Spoofing Threat: Development of a Portable GPS Civilian Spoofers. In: Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, GA.
- Lin, A. Y.; Kuehl, K.; Schöning, J. (2017): Understanding “Death by GPS”: A Systematic Study of Catastrophic Incidents Associated with Personal Navigation Technologies. In: Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI), May 2017. DOI: [10.1145/3025453.3025737](https://doi.org/10.1145/3025453.3025737).
- Maritime Executive (2017): Mass GPS Spoofing Attack in Black Sea? 11-July-2017. www.maritime-executive.com/editorials/mass-gps-spoofing-attack-in-black-sea, letzter Zugriff 04/2018.
- O'Driscoll, C. (2018): What is navigation message authentication? In: InsideGNSS, Jan/Feb 2018.
- Popular Mechanics (2016): North Korea Is Jamming GPS Signals. 5-Apr-2016. www.popularmechanics.com/military/weapons/a20289/north-korea-jamming-gps-signals, letzter Zugriff 04/2018.
- Rügamer, A.; Kowalewski, D. (2015): Jamming and Spoofing of GNSS Signals – An Underestimated Risk?! In: Tagungsband FIG Working Week 2015.
- Rügamer, A.; Suberviola, I.; Förster, F.; Rohmer, G.; Konovaltsev, A.; Basta, N.; Meurer, M.; Wendel, J.; Kaindl, M.; Baumann, S. (2011): A Bavarian Initiative towards a Robust Galileo PRS Receiver. In: Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS 2011, September 19–23, 2011, Portland, Oregon, USA.
- Seo, J.; Kim, M. (2013): eLoran in Korea – Current Status and Future Plans. In: Proceedings of the European Navigation Conference 2013, Vienna, Austria.
- STRIKE3 (2018): STRIKE3 – Monitor, Detect, Characterise, Standardize, Mitigate and Protect. www.gnss-strike3.eu, letzter Zugriff 04/2018.
- Süddeutsche Zeitung (2016): Rund um den Kreml spielt das GPS verrückt. 31-Oct-2016. www.sueddeutsche.de/digital/moskau-lost-in-navigation-1.3228389, letzter Zugriff 04/2018.
- uBlox (2017): u-blox 8/u-blox M8 Receiver Description. In: UBX-13003221, R14, 24 Oktober 2017.
- UTNews (2013): Spoofing a Superyacht at Sea, 30-July-2013. <http://news.utexas.edu/2013/07/30/spoofing-a-superyacht-at-sea>, letzter Zugriff 04/2018.
- Van der Merwe, R.; Zubizarreta, X.; Lukcin, I.; Rügamer, A.; Felber, F. (2018): Classification of Spoofing Attack Types. In: Proceedings of the European Navigation Conference 2018, to be published.

Windward (2014): AIS Data on the High Seas: An Analysis of the Magnitude and Implications of Growing Data Manipulation at Sea. www.windward.eu/wp-content/uploads/2015/02/AIS-Data-on-the-High-Seas-Executive-Summary-Windward-October-20-2014.pdf.

Kontakt

Alexander Rügamer
Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS)
Nordostpark 84, 90411 Nürnberg
alexander.ruegamer@iis.fraunhofer.de

Bestimmung der schiffdynamischen Parameter mittels GNSS

Dirk Kowalewski

1 Zusammenfassung

Mit dem Verbundvorhaben siNafa wird erstmals ein Drei-Antennen-GNSS-System entwickelt, das selbständig genaue relative Positionen ermittelt, aus denen die Bewegungen in allen sechs Freiheitsgraden und die Beschleunigungen an jedem Ort des Schiffes bestimmt werden können. Diese Informationen tragen einerseits zur Sicherheit der Ladung, des Schiffskörpers und der Besatzung bei und bieten andererseits z. B. für einen Kapitän eines Kreuzfahrtschiffes wichtige Informationen zum Wohlbefinden seiner Passagiere. Damit diese hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit erreicht werden kann, müssen Mehrfrequenz-Empfänger eingesetzt werden. Bisher sind in der Schifffahrt fast ausschließlich GPS L1 Receiver eingesetzt und nur sehr wenige GPS/GLONASS Einfrequenz-Empfänger.

Eine unterschätzte Gefahr ist die absichtliche oder unabsichtliche Störung der GNSS (Global Navigation Satellite System)-Signale durch Jamming oder Spoofing. In diesem Projekt wird ein System zur Erkennung dieser Signale entwickelt. Hierbei wird nicht nur das Vorhandensein der Störung ermittelt, sondern auch eine Richtungsschätzung durchgeführt. Die Mitteilung einer Störung (Jamming) oder einer Verfälschung (Spoofing) des GNSS-Signals ist eine wertvolle und unter Umständen lebensrettende Information für die Schiffsbesatzung und deren Passagiere. Damit die wichtigen Informationen wie Schiffsbewegungen, Beschleunigungen, Jamming und Spoofing zuverlässig in die Software eines Schiffes einfließen können und die Schiffführung bei ernsthafter Gefahr mit bord-autonomen Navigationssystemen weitergeführt werden kann, ist es eine wichtige Aufgabe, die Sensorfusion und die Integration in das Schiffführungs- system in diesem Projekt durchzuführen.

2 Einleitung

Für die Bundesrepublik Deutschland spielt die Hochseeschifffahrt in zweierlei Hinsicht eine große Rolle. Zum einen ist der sichere Transport von Gütern für die Wirtschaft von großer Bedeutung. Die Bundesrepublik Deutschland hat im

Jahre 2013 für fast 1500 Milliarden US-Dollar Waren ausgeführt. Der Großteil dieser Waren wird mit Containerschiffen auf dem Seeweg transportiert. [Abb. 1](#) zeigt die Entwicklung der Kapazität des Containerumschlags der acht wichtigsten Welthäfen (Shanghai, Singapur, Hongkong, Besan, Dubai, Rotterdam, Hamburg, Los Angeles) zwischen 2011 und 2015. Diese Zahlen sind nicht saisonbereinigt, zeigen aber ein deutliches Wachstum. Die vertikale Skala ist in Prozent dargestellt, wobei März 2011 mit 100 % als Ausgangswert festgelegt worden ist.



Abb. 1: Wachstumszahlen Container in Prozent

Zum anderen ist die Seeschifffahrt mit Passagieren ebenfalls von großer Bedeutung. Kreuzfahrten erfreuen sich immer stärkerer Beliebtheit mit Wachstumsraten zwischen 10 und 20 % pro Jahr. 2010 lag der Umsatz der beiden deutschen Reederei Aida und Hapag Lloyd zusammen bei ca. 2 Milliarden Euro mit 1,2 Millionen Passagieren. Das Unglück der Costa Concordia im Januar 2012 hat hier die Reedereien sensibilisiert, höhere Sicherheitsstandards einzuführen. Die Abwehr durch Jamming und Spoofing potenziell herbeigeführter Gefahren ist für Passagierschiffe besonders wichtig. Die genaue Kenntnis der Beschleunigungswerte an jeder Stelle des Schiffes kann zur Steigerung des Komforts für die Passagiere genutzt werden.

Die Motivation für den vorliegenden Projektantrag ist es, die Navigation auf Hochseeschiffen sicherer zu machen. Hierfür sollen neue Signale und Frequenzen von allen Navigationssatellitensystemen genutzt werden um die Verfügbarkeit und Genauigkeit des GNSS-Empfangs zu erhöhen. Die Verwendung innovativer Gruppenantennen-Technologie ermöglicht es, die GNSS-Navigation vor Störern und Täusichern zu schützen und das Vorhandensein dieser Signale sicher zu erkennen. Mit Hilfe eines neuen GNSS-Systems mit drei Antennen sollen die Bewegungen und Beschleunigungen des Schiffes exakt gemessen werden. Alle Komponenten werden in eine moderne IT-Infrastruktur eingebunden und zusammen mit bord-autonomen Navigationsgeräten gekoppelt.

3 Ziele

Hauptziele des geplanten Forschungsvorhabens: Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung von verschiedenen Komponenten, welche im Zusammenspiel einen Innovationssprung für die Erhöhung der Sicherheit und Zuverlässigkeit der Schiffstechnik und des Schiffsbetriebs darstellen. Diese Komponenten sind:

- Entwicklung eines genauen, stör- und täuschungssicheren GNSS-Sensors für die sichere Navigation in der Schifffahrt. Dabei soll eine Mehrantennen-Array-Signalverarbeitung zur räumlichen Störer- und Täuscher-Detektion verwendet werden.
- Entwicklung eines GNSS-Systems mit drei Antennenpositionen und offenem Betriebssystem. Es wird das OGRP Format zum Datentransport weiterentwickelt und systemoffen für alle Schiffssensoren konzipiert.
- Integration von Mess- und Auswertedaten von autonomen Systemen an Bord von ausrüstungspflichtigen Schiffen mit den GNSS-Komponenten zum Zweck der Unterdrückung der schädlichen Auswirkungen von Störern und Täusichern; Schwerpunkte hierbei sind die wissenschaftliche Erforschung und Erprobung der Vorsteuerung der Regelschleifen des GNSS-Sensors mit bord-autonom ermittelten Ortungsdaten zur Minimierung von deren Arbeitsbereichen durch leistungsfähige Multihypothesen-Optimalfilterverfahren zur robusten und fehlertoleranten hybriden Sensordatenfusion.
- Erfassung, Berechnung und Überwachung der Schiffsbewegung mit Hilfe von hochgenauen GNSS-Sensoren in Echtzeit, um u. a. der Nachweisführung von Arbeitssicherheit, Wohlbefinden der Personen an Bord sowie der Sicherheit der Ladung und des Schiffs zu dienen. Der Vergleich der mittels GNSS bestimmten Bewegungsparameter mit bord-autonom Daten ermöglicht eine indirekte Detektion von Störungen.

Die Erreichung dieser Ziele soll durch eine enge Zusammenarbeit der o. g. Projektpartner erfolgen. Sie ergänzen sich in idealer Weise, da sie die erforderliche Expertise in unterschiedlichen Disziplinen einbringen. Eine Kooperation zur Erprobung der entwickelten Messtechnik an Bord des Containerschiffes Kobe Express wird im Rahmen des Projektes stattfinden. Hierzu gibt es ein Schreiben der Reederei Hapag Lloyd, in dem dargelegt wird, dass sie das Projekt als assoziierter Partner unterstützen und uns erlauben, die erforderlichen Installationen an Bord durchzuführen. Des Weiteren dürfen wir zur Erprobung und Testmessungen die Kobe Express auf einigen Reisen begleiten.

Weitere Unterstützung erhalten wir durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie indem wir unser Drei-Antennen-GNSS-System auf einem der Vermessungsschiffe installieren dürfen. Darüber hinaus besteht hier die Möglichkeit, unser System mit dem vorhandenen Positionsbestimmungs-

system (GNSS + Trägheitsmesssystem/Inertialnavigationssystem) zu vergleichen.

4 Stand der Wissenschaft und Technik

4.1 GNSS-Empfängertechnologie

Alle kommerziellen GNSS-Empfängerhersteller entwickeln geschlossene Systeme. Hersteller wie Novatel, Septentrio und Javad geben sog. Programmierhandbücher heraus und erlauben dem Anwender auch über die Kommandoebene Befehle zu erteilen. Dadurch lassen sich die Receiver über selbst entwickelte Software ansteuern und Daten abrufen. Es gibt allerdings nur die Möglichkeit, die Daten in den vordefinierten Formaten zu verarbeiten und niemand hat Zugriff auf die absoluten Rohdaten. Wiederum andere Hersteller wie Trimble und Topcon geben keine Informationen zur Ansteuerung ihrer GNSS Boards heraus. Ihr Anspruch ist es, komplette Systeme zur Vermessung oder zur Steuerung von Maschinen auf den Markt zu bringen und damit ihre Märkte zu kontrollieren. Beispielhaft sei hier der Baumaschinenmarkt genannt, wo Trimble und Topcon keinen nennenswerten Wettbewerb haben.

Es gibt immer mehr präzise GNSS-Anwendungen, die den Zugang zu den absoluten Rohdaten und die Installation von eigener Software auf dem GNSS Board notwendig machen. Genau das ist der Anspruch des OSR Receivers von navXperience. Wir haben hier ein offenes LINUX Betriebssystem installiert und den Zugang zu den Rohdaten über unser Open GNSS Receiver Protokoll (OGRP) geschaffen. Recherchen haben ergeben, dass es außer bei navXperience keinen solchen Mehrfrequenz-GNSS-Receiver zu erwerben gibt. Es gab ein Projekt namens GPL-GPS aus dem Jahre 2008, welches aber inzwischen eingestellt worden ist. Hier hat man versucht, ein eigenes Betriebssystem zu entwickeln und nicht auf ein Standard LINUX aufzusetzen. Schon nach kurzer Zeit war die Hardware so veraltet, dass eine völlig neue Entwicklung notwendig gewesen wäre. Ähnlich verhielt es sich mit dem Namuru V1 Receiver von der University of New South Wales. Diese Empfängerplattform wurde im Zuge eines Projektes der DLR (Grillenberger et al. 2008) eingesetzt. Es folgten Weiterentwicklungen des Namuru Empfängers V2 und V3, die aber nicht mehr verfügbar sind. Ziel des DLR Projekts war es, einen weltraumtauglichen GNSS Receiver zu entwickeln, nicht einen präzisen GNSS Receiver für genaue Anwendungen. Die Rechenleistung hätte dafür auch nicht ausgereicht.

Auf der wissenschaftlichen Ebene gibt es ferner Software Defined Radios (SDRs). Es werden sog. Front-Ends verwendet, um die analogen GNSS-Signale zu empfangen. Mit einem herkömmlichen PC werden die Signale verarbeitet

und prozessiert. Diese Ansätze sind nicht für eine kommerzielle Anwendung geeignet. Nicht nur Größe, Gewicht und Stromverbrauch, sondern auch die langsame Verarbeitungsgeschwindigkeit lassen eine Verwendung im siNafa nicht zu. Nur durch die Verwendung der OSR Plattform von navX kann Raytheon Anschütz das wichtige Arbeitspaket „3400 Analyse und Vorsteuerung der GNSS-Regelschleifen“ durchführen und die Software direkt auf dem Receiver installieren. Eine vergleichbare Technologie, die dem Anwender diese Möglichkeiten eröffnet, existiert derzeit nicht.

4.2 Mehrantennensysteme

In der Schifffahrtsindustrie gibt es nur wenige Zwei-Antennen-GNSS-Systeme, sog. GPS-Kompass. Es sind typische Hersteller für Schiffstechnologie wie Furuno, Simrad und Hemisphere. Diese Systeme haben nichts mit der von uns angestrebten Entwicklung zu tun. In den Systemen sind günstige Einfrequenz-GNSS-Receiver verbaut, welche die Roll-, Stampf- und Gierwinkel mit einer Genauigkeit von 0,5 bis 1,5° messen können. Zwei Hersteller bieten ein drei Antennensystem an: die Firma Japan Radio Co. Ltd und der NaviStar von Northrop Gumman. Aber auch hier werden nur Einfrequenz-GNSS-Receiver verwendet und alle sechs Freiheitsgrade werden nur mit einer Genauigkeit von 0,5° gemessen.

Bei den Mehrfrequenz-Empfänger Herstellern gibt es drei Anbieter von sog. Heading Receivern die belgische Firma Septentrio, der kanadische Hersteller Novatel und der Marktführer Trimble aus den Vereinigten Staaten von Amerika (siehe Tab. 1). Bei diesen Technologien wird eine Antenne zur genauen 3D-Positionsbestimmung genutzt und mit der zweiten die Richtung bestimmt. Diese Technologie findet ihren Einsatz hauptsächlich in der Steuerung von Maschinen – der größte Anwendungsbereich ist die Steuerung von Baggern. Auch im maritimen Bereich findet dies vereinzelt Anwendung.

Septentrio hat zwei Heading Receiver: der erste heißt AsteRx2eH und hat ein Mehrfrequenzboard für GPS- und GLONASS-Satelliten. Die für das Projekt maßgeblichen Genauigkeiten sind im Prospekt wie folgt angegeben: bei 1 m Antennenabstand Rollen und Stampfen 0,6° und Gieren mit 0,3°. Die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung ist mit 0,008 m/s (0,03 km/h) angegeben. Das zweite Modell ist der AsteRx4 und ist ein Mehrfrequenz-Empfänger für GPS, GLONASS, Galileo und BeiDou. Die Genauigkeit für Rollen und Stampfen ist mit 0,2° angegeben und für das Gieren mit 0,1°, also wesentlich genauer als beim AsteRx2eH. Die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung wird mit 0,01 m/s (0,04 km/s) angegeben – sehr viel ungenauer als beim älteren Modell. Es stellt sich für uns die Frage, warum man die Winkel mit dem neueren Modell genauer messen kann, als die erste Ableitung, nämlich die der Geschwindigkeit.

Tab. 1: Mehrfrequenz-Empfänger Hersteller

Hersteller/Gerätebezeichnung	Trimble/ BD982	Novatel/ OEM617D	Septentrio/ AsteRx4
Genauigkeit Gieren	0,18°	0,16°	0,1°
Genauigkeit Rollen/Stampfen	–	0,16°	0,2°
Genauigkeit Geschwindigkeit	0,007	0,03	0,01 m/s

Von Novatel gibt es den Receiver OEM617D, ein GPS-, GLONASS-, BeiDou- und Galileo-Empfänger. Im Prospekt sind folgende Genauigkeiten angegeben: Geschwindigkeit 0,03 m/s (0,11 km/h) und für Gieren, Rollen und Stampfen 0,16°. Auch hier fällt wieder auf, dass die Genauigkeitsangaben im Vergleich zu Septentrio nicht ins Verhältnis passen. Für den Endanwender ist die Überprüfung der Angaben in den Broschüren sehr schwierig.

Trimble vertreibt u.a. das High-End BD982 Board, das GPS, GLONASS, Galileo und BeiDou empfangen kann. Man findet hierzu folgende Angaben im Prospekt: 0,18° für 1 m Antennenabstand für das Gieren (Rollen und Stampfen keine Angaben) und die Genauigkeit der Geschwindigkeit wird mit 0,007 m/sec (0,03 km/h) angegeben.

Da es sich hier nur um Zwei-Antennen-Systeme handelt, sind sie nicht 100 % mit unserer Entwicklung vergleichbar. Wir werden in unserem Arbeitspaket 8400 das Rollen, Stampfen, Gieren und die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung mit dem Septentrio AsteRx4 vergleichen. Wir gehen davon aus, durch den Einsatz von drei Antennen und der Überbestimmung wesentlich bessere Resultate zu erreichen. Wahrscheinlich erreichen wir eine Genauigkeit von 0,05° oder besser in Rollen, Stampfen und Gieren.

In 2005 kam Septentrio mit dem bisher einzigen Drei-Antennen-Receiver auf den Markt. Auf der ION 2005 wurde die Technologie in einem Paper (Kuylen et al. 2005) vorgestellt. Im Paper werden folgende Genauigkeiten beschrieben: im Rollwinkel 0,5°, im Gieren 0,2° und im Stampfen 0,5°. Wir haben diese Receiver im Vorfeld des Modesh-Projektes getestet und große Defizite festgestellt. Die maximale Wiederholrate für Messungen waren 5 Hz und hierbei lieferte der Receiver nicht alle Daten. In einer Minute gab es drei bis zehn Datensätze, die verloren gingen. Bei 1 Hz lief er stabil, was aber für exakte Messungen der sechs Freiheitsgrade zu gering ist. Nur die Masterantenne empfing Mehrfrequenzdaten, die beiden anderen Antennen konnten nur die GPS L1 Frequenz verarbeiten. Damit waren die Initialisierungszeiten mit ca. 15 Minuten sehr lang. Das ist wahrscheinlich auch der Grund, warum es diesen Receiver seit 2008 nicht mehr zu erwerben gibt.

5 Erreichte Ziele

Im Oktober 2017 ergab sich die Gelegenheit, auf dem Vermessungs- und Forschungsschiff Deneb der BSH unsere Entwicklung zu testen. Nachfolgend die Ergebnisse.

[Abb. 2](#) zeigt das Rollen über einen Zeitraum von einer Minute. Die Fahrt geht durch den Nordostseekanal, es ist so gut wie gar kein Rollen zu sehen. Der Abstand zwischen den beiden dicken horizontalen Linien ist 0,05°. [Abb. 3](#) zeigt das Stampfen, das ebenfalls so gut wie gar nicht vorhanden ist. [Abb. 4](#) zeigt das Rollen und [Abb. 5](#) das Stampfen der Deneb in der Nordsee.

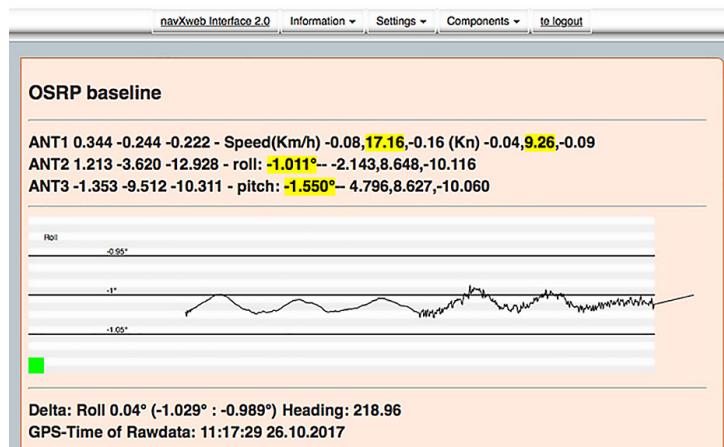


Abb. 2:
Rollen

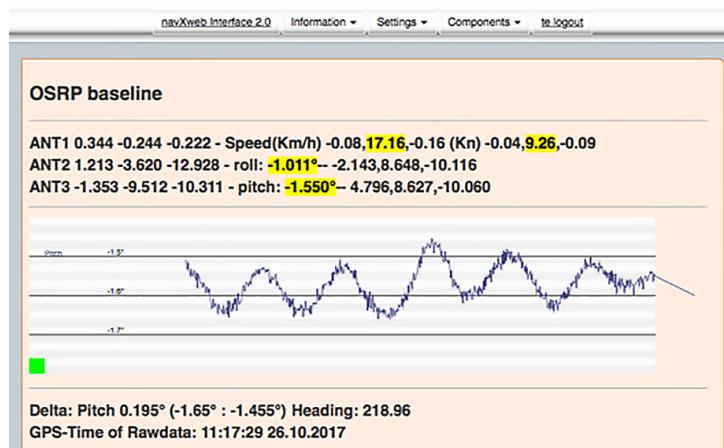


Abb. 3:
Stampfen

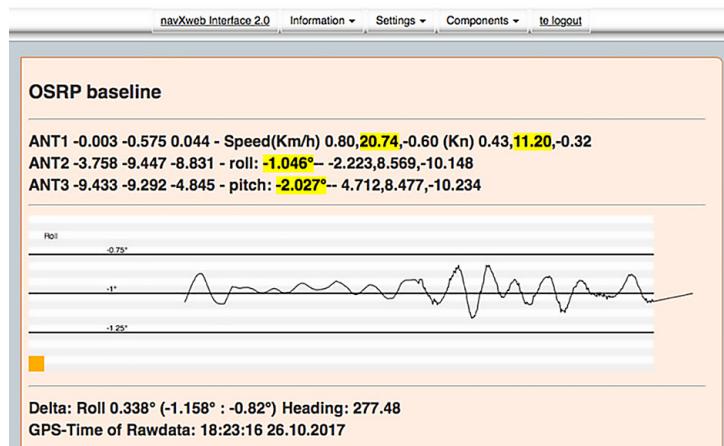


Abb. 4:
Rollen
(Nordsee)

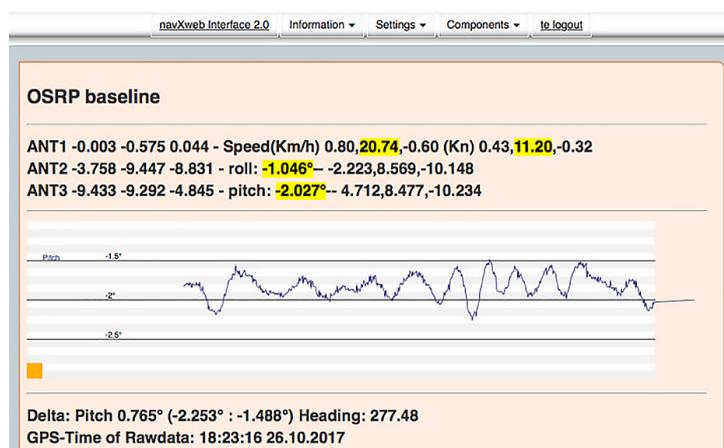


Abb. 5:
Stampfen
(Nordsee)

Literatur

- Avila-Rodriguez, J.; Hein, G. W.; Wallner, S.; Issler, J.-L.; Ries, L.; Lestarquit, L.; de Latour, A. (2007): The MBOC Modulation: The Final Touch to the Galileo Frequency and Signal Plan. Proceedings of ION GNSS 2007, Fort Worth, Texas, USA.
- Böder, V. (2009): Untersuchung von Lagewinkelsensoren. In: DVW e. V. (Hrsg.): Hydrographie – Neue Methoden von der Erfassung zum Produkt. DVW-Schriftenreihe, Band 58, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Dötterböck, D.; Ko, S.; Eissfeller, B. (2011): Multi-Constellation RTK with a Software Receiver. Proceedings of the ION GNSS 2011, Portland, Oregon, USA.

- Dybek, J.; Böder, V.; Wirth, H. und Seeber, G. (1998): Optimierung der hydrographischen Positions- und Lagebestimmung. Gemeinsamer Schlussbericht zum BMBF-Vorhaben FKZ MTK 590 A und MTK 590 B. Koblenz und Hannover.
- Eissfeller, B.; Pany, T.; Biberger, R.; Schueler, T. (2002): Instantaneous Ambiguity Resolution for GPS/GALILEO RTK Positioning. Journal for Gyroscopy and Navigation (Russian), vol. No. 3 (38), 71–91.
- Eissfeller, B.; Tiberius, C.; Pany, T.; Heinrichs, G. (2002): Real-Time Kinematic in the Light of GPS Modernisation and Galileo. Galileo's World, 28–34, Fall 2002.
- Hahn, J.; Powers, E. (2007): A Report on GPS and Galileo Time Offset Coordination Efforts. Proceedings of TimeNav'07, Geneva, Switzerland.
- IALA (2008): IALA Recommendation R-129 on GNSS Vulnerability and Mitigation Measures. Edition 2, Dez. 2008.
- Pany, T. (2010): Navigation Signal Processing for GNSS Software Receivers. Artech, House.
- Wikipedia (2014): Network Time Protocol, 5 March 2014. http://en.wikipedia.org/wiki/Network_Time_Protocol.

Kontakt

Dipl.-Ing. Dirk Kowalewski
navXperience GmbH
Querweg 20, 13591 Berlin
dirk.kowalewski@navxperience.com

Session 4: Unbemannte Erfassungssysteme

Unterwasserkommunikation, Systemvernetzung und autonome Kommunikation im Projekt BOSS

Horst Hellbrück | Gunther Ardelt

1 Einführung

Die beständige Weiterentwicklung der Unterwassertechnik, aber auch der modernen Informations-, Kommunikations- und Rechnertechnik, erlaubt es vermehrt Unterwasserfahrzeuge zu entwickeln und zu betreiben, die autonom Entscheidungen fällen. Diese Fähigkeiten ermöglichen neue Einsatzzwecke und neue Anwendungen für Unterwasserfahrzeuge, die vor ein paar Jahren nicht vorstellbar waren.

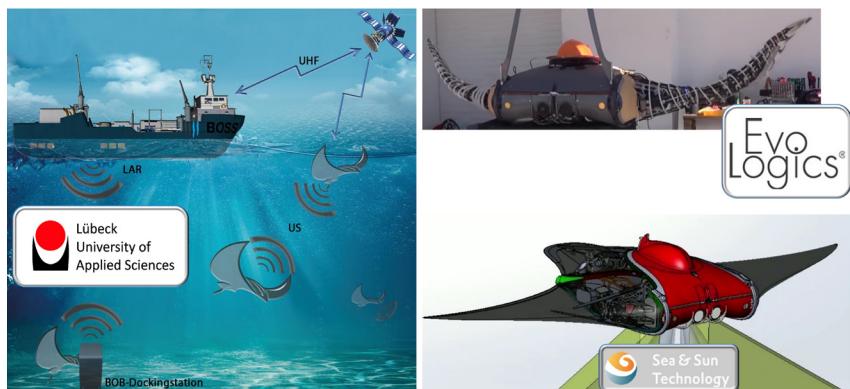


Abb. 1: Systemübersicht und Projektpartner

Die EvoLogics GmbH (Berlin, Deutschland) hat dazu einen bionischen Mantar, ein neuartiges bionisches Fahrzeug entwickelt, das im Rahmen des Projekts Bionic Observation and Survey System (BOSS) eingesetzt wurde, siehe Abb. 1 und Abb. 2. BOSS war eine gemeinsame Forschungsarbeit, die vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert wurde. Neben dem Koordinator EvoLogics GmbH waren die Fachhochschule Lübeck und die Sea & Sun Technology GmbH (Trappenkamp, Deutschland) die weiteren Projektpartner in diesem Projekt (siehe auch Abb. 1). Durch die Kombination innovativer



Abb. 2: Manta in Aktion (EvoLogics 2017)

bionischer Konzepte mit modernen Komponenten der Meerestechnik entstand ein leistungsstarkes und flexibles Unterwasser-Explorations- und -Überwachungssystem, das sich mit seinen einzigartigen funktionellen Eigenschaften besonders zur Beobachtung und Exploration von schwer zugänglichen oder noch unerforschten Gebieten eignet. Die bionischen Unterwasserfahrzeuge können zum einen ferngesteuert, aber auch teilautonom und vollautonom agieren. Im Teilprojekt BOSS-COGNET der Fachhochschule Lübeck, das in diesem Artikel näher beschrieben wird, wurden die speziellen Anforderungen des Systems an die Kommunikation insbesondere unter Betrachtung eines autonomen Handelns der Mantas untersucht und gelöst. In BOSS-COGNET wurde ein dynamisches, mobiles Unterwasser-Intranet auf Basis von heterogener, flexibler Ad-Hoc-Vernetzung geschaffen, welches in das bestehende Internet integriert wurde. In einem weiteren Schwerpunkt wurden die Mantas befähigt, kooperative Aufgaben selbstlernend auf Basis von Standardmanövern umzusetzen.

In Kap. 2 werden die Aufgaben eines solchen Systems kurz beschrieben. Aus diesen Aufgaben werden die Anforderungen an die Kommunikation und die Autonomie abgeleitet. Nach der Beschreibung der Umsetzung dieser Anforderungen schließt der Artikel mit einer Leistungsbewertung der Kommunikation und der Autonomie ab.

2 Aufgaben

Das BOSS-System ist ein sich selbst koordinierender Schwarm autonomer Unterwasserfahrzeuge (AUVs), die in einem Zielgebiet zur Beobachtung, Untersuchung und Vermessung eingesetzt werden. Die AUVs sind alle in ein multimediales Sensornetzwerk mit modernsten Kommunikations- und Navigationstechniken eingebunden. Der AUV-Schwarm, der eine Nutzlast von Instrumenten transportiert, kartiert z. B. das Zielgebiet, sammelt Daten über die Unterwasserumgebung und stellt eine drahtlose Verbindung zu einer Basisstation für eine Echtzeitüberwachung bereit.

Die Vernetzung des AUV-Schwarms besteht wie bereits erwähnt aus einem dynamischen Unterwasser-Intranet, basierend auf heterogener, flexibler Ad-Hoc-Vernetzung mit Telemetrie-Anbindung. Das Unterwasser-Intranet ist dabei in das Internet über Gateways integriert, so dass die Mantas über verschiedene Kommunikationstechniken jederzeit erreichbar sind. Als Kerninnovation sind die autonomen Mantas mit speziellen Sensormodulen sowie multimedial vernetzbaren Kommunikations- und Navigationsschnittstellen ausgestattet. In einem umfangreichen Experimentalprogramm wurden intelligente kognitive und auto-adaptive Eigenschaften der Mantas entwickelt und Techniken der interoperablen Systemvernetzung für die Kommunikation und Navigation erprobt. Sukzessive wurden danach Fähigkeiten zu kooperativem Verhalten und zur Selbstorganisation im Schwarm ausgebildet.

3 Anforderungen an Kommunikation und Autonomie

Bisherige Verfahren zur Unterwasserkommunikation sind auf hohe Reichweite optimiert und bieten nur geringe Datenraten von einigen kbit/s. Im Bereich der Schwarmkommunikation ist aber meist das Gegenteil gewünscht. Dort soll mit hoher Datenrate von einigen hundert kbit/s über geringe bis mittlere Distanzen (5 bis 50 m) kommuniziert werden. Für die Übertragung von Daten an eine Basisstation, die während einer Mission gesammelt worden sind, gibt es ähnliche Anforderungen mit nochmals gesteigerter Datenrate. Aus diesem Grund war die Implementierung und Evaluierung innovativer Verfahren zur Unterwasserkommunikation mit hohen Datenraten eine zentrale Aufgabe im Projekt BOSS.

Abb. 3 zeigt eine Klassifizierung der heute vorhandenen Kommunikationstechniken in drei Typen, die sich durch die Datenraten und Reichweiten unterscheiden. Von links nach rechts nehmen die Datenrate ab und die Reichweite zu. Ab einer Reichweite von ca. hundert Metern ist die Datenrate so gering, dass z. B. eine Übertragung von Kamerabildern nicht mehr möglich ist. Dadurch ist die Steuerung des Fahrzeugs über eine drahtlose Kommunikation mit

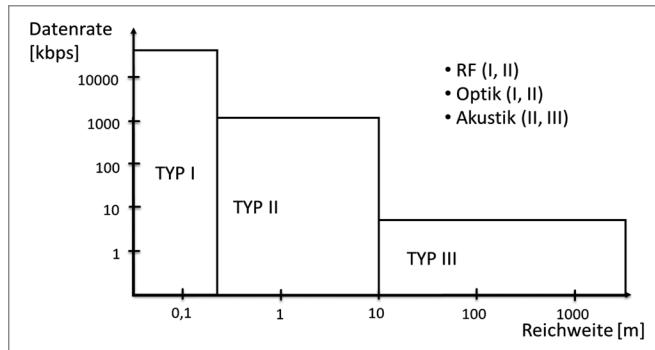


Abb. 3:
Klassifizierung von Typen der Unterwasserkommunikation nach Reichweite und Datenrate

zunehmender Entfernung erschwert, so dass die Fahrzeuge um die Fähigkeit zur Autonomie erweitert werden mussten, einerseits damit sie eigene Entscheidungen treffen, andererseits zur Erhöhung der Zuverlässigkeit des Systems.

Autonomie lässt sich über klassische Programmierung nur schwer erreichen, da nicht alle real auftretenden Fälle im Vorfeld berücksichtigt werden können und eine korrekte Auswahl und Reihenfolge der Maßnahmen in Software nur schwer festzulegen ist. Daher wurden neuartige Algorithmen entworfen und simuliert, auf deren Basis ein regelbasiertes Expertensystem entworfen wurde, welches umgesetzt und schrittweise erweitert wurde. Für Praxistests und Optimierungen wurden vorhandene drahtlose Sensor testbeds und bisher gewonnene Erfahrungen im Aufbau von Simulatoren und Testbeds eingesetzt.

4 Umsetzung der Kommunikation

Eines der Hauptziele des Projektes war die Vernetzung der Fahrzeuge und der Fahrzeugkomponenten untereinander. Dazu war zum einen ein Vernetzungskonzept notwendig, sowie darüber hinaus geeignete Verfahren zur Unterwasserkommunikation, die im Folgenden vorgestellt werden.

4.1 Vernetzung

Die Fahrzeuge kommunizieren im aufgetauchten Zustand mittels WLAN untereinander und mit der Basisstation. Die Struktur des WLAN-Netzes ist ein sogenanntes „Mesh-Netz“. Ein Mesh-Netz ermöglicht eine Kommunikation über Zwischenstationen, wenn Kommunikationspartner nicht in direkter Funkreichweite sind. Dieses Mesh-Netz dehnt sich auch auf die Unterwasserkommunikation aus. So kommunizieren Kommunikationspartner unter Wasser mit Zwischenstationen, die sich über Wasser befinden.

Abb. 4 zeigt eine schematische Darstellung eines Mesh-Netzes. Die Basisstation kommuniziert per WLAN mit Manta 2 über den Zwischenknoten Manta 1. Manta 3 und Manta 4 sind ebenfalls über Manta 1 erreichbar, wobei hier die Unterwasserkommunikation zum Einsatz kommt, die in diesem Beispiel als Kommunikation über ein elektrisches Feld realisiert ist.

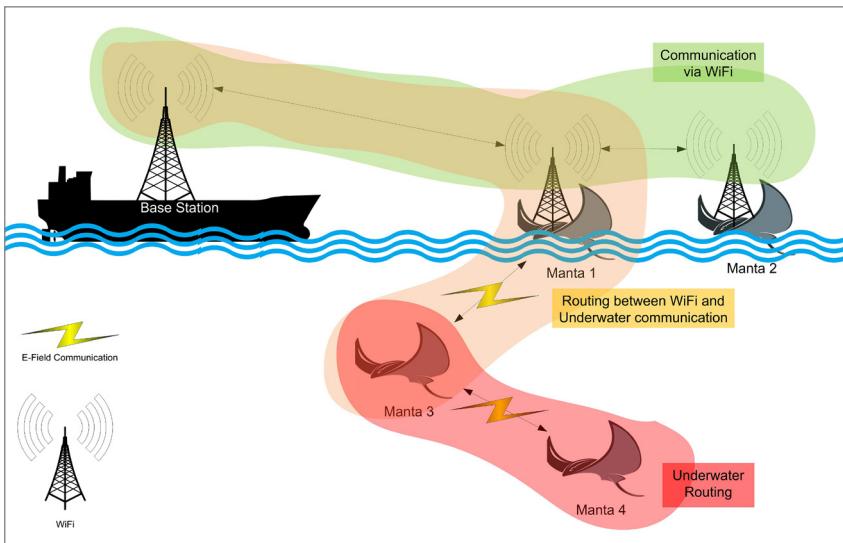


Abb. 4: Mesh-Netz mit WLAN über Wasser und elektrischer Feldkommunikation unter Wasser

Um die Vernetzung und die verteilten Algorithmen zu testen, wurde ein Testbed aufgebaut, welches einen Teil der vernetzten elektronischen Komponenten von vier Fahrzeugen enthält. Mit dem Testbed wurde die Integration von Sensoren in die interne Fahrzeuginfrastruktur vorgenommen, und es wurden Langzeittests von Sensoren und Programmen durchgeführt. Abb. 5 zeigt das Testbed, wobei die Komponenten des AUV 1 (Manta 1) detailliert dargestellt sind. AUV 2 bis AUV 4 haben den gleichen Aufbau und sind rechts oben gezeigt.

Der Testbed-Wartungsrechner (Testbed Maintenance Computer) ermöglicht den Entwicklern (Developer) permanenten Zugriff auf die Komponenten über einen Wartungsbus (Maintenance Bus). Im Fall einer temporären Fehlfunktion des Netzes können alle Komponenten weiterhin über diesen Bus erreicht werden. Eine explizite Darstellung der entwickelten Vernetzungsarchitektur, des Testbeds und der Schnittstellen gibt Teubler et al. (2016a, 2016b).

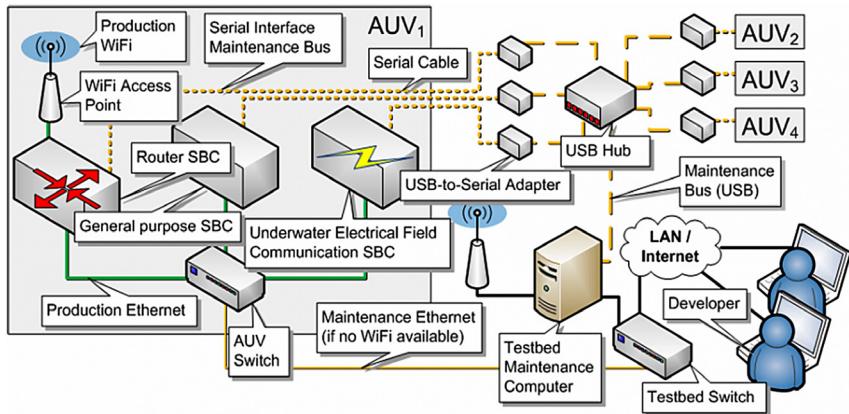


Abb. 5: Testbed mit den vernetzten Komponenten und detaillierte Darstellung der Vernetzung von AUV 1

4.2 UW-Kommunikation

Zur flexiblen Implementierung und Evaluierung der verschiedenen Verfahren zur Unterwasserkommunikation wurde ein modulares System entwickelt. Das System hat eine modulare Architektur, unterstützt verschiedene Kommunikationstechniken und Softwaremodule. Eine Übersicht der Systemarchitektur ist in Abb. 6 dargestellt. Neben den hier dargestellten allgemeinen Informationen zum Entwicklungssystem nennen Ardel et al. (2016) eingehende Details zur entwickelten Plattform.

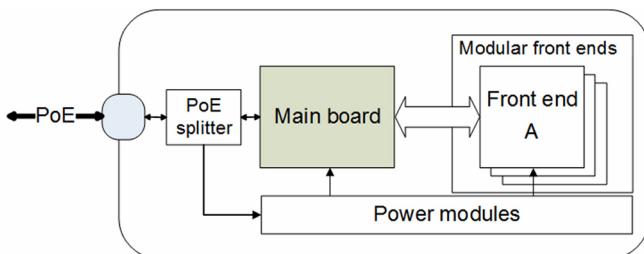


Abb. 6:
Schematische
Darstellung der
Architektur des
Kommunikations-
moduls für die
Unterwasser-
kommunikation

Dabei wurden drei Kommunikationsmodule mit zugehörigen Frontends entwickelt, in denen jeweils eine optische, eine elektrische und eine akustische Datenübertragung implementiert sind. Mit dem optischen Kommunikationsmodul sind die höchsten Datenraten erreichbar und mit dem akustischen Modul die niedrigsten Datenraten, dieses bietet jedoch eine höhere Reichweite (siehe auch Abb. 3).

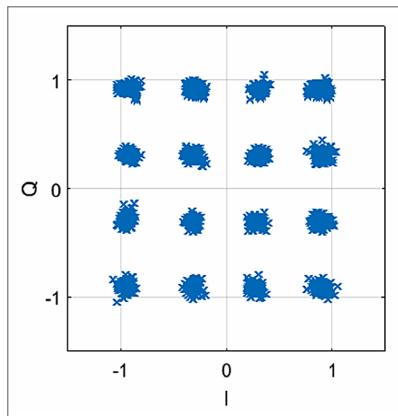


Abb. 7: Gemessenes Konstellationsdiagramm einer 16Q AM-Übertragung (4 Bit pro Symbol)

Als Modulationsverfahren für alle drei Verfahren wird OFDM eingesetzt. Dabei können bis zu 256 Trägerfrequenzen gleichzeitig genutzt werden und eine Bandbreite von bis zu 1 MHz. Die Mittenfrequenz ist in einem Bereich von 15 kHz bis 30 MHz frei einstellbar. Als Modulationsverfahren stehen 256 QAM, 128 QAM, 64 QAM, 16 QAM, QPSK und BPSK je nach Signalqualität zur Verfügung (siehe Abb. 7 für 16 QAM). Die Kommunikationsmodule unterstützen bidirektionale Kommunikation und eine beliebige Länge von Kommunikationsrahmen, wobei typisch Rahmen bis zu einer Größe von 2048 Byte verwendet werden.

4.2.1 Elektrische Feldkommunikation

Da herkömmliche Funksignale mit hohen Frequenzen, wie z. B. WLAN, unter Wasser sehr stark gedämpft werden, wurde ein Ansatz mit sehr niedrigen Frequenzen unterhalb von 1 MHz gewählt. Mit diesem Ansatz ist es möglich, Daten über mehrere Meter mit hohen Datenraten zuverlässig zu übertragen. Durch die niedrige Frequenz findet die Übertragung im Nahfeld eines Elektroden-Dipols

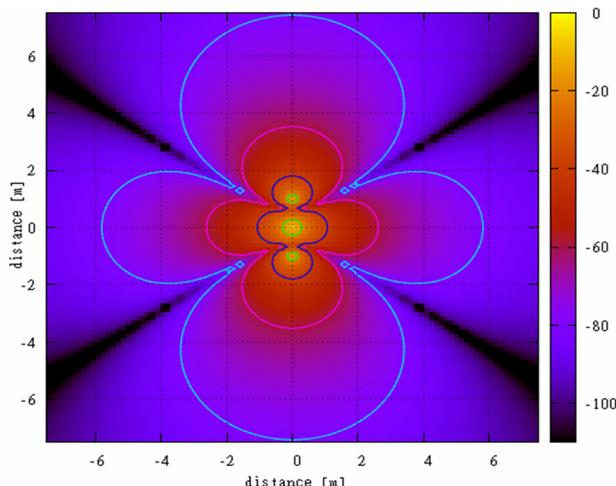


Abb. 8:
Simulation der Empfangsstärke an einem Elektroden-Dipol in Abhängigkeit von der Orientierung und Entfernung zu einem Sender-Dipol

statt, sodass dieses Verfahren als Elektrische Feldkommunikation bezeichnet wird, siehe Esemann et al. (2014).

Der Nachteil dieser Kommunikation ist eine starke Richtungsabhängigkeit des elektrischen Felds bei der Nutzung von Elektroden-Dipolen, die in Abb. 8 dargestellt ist. Als Gegenmaßnahme wird ein zweiter Dipol angewandt, womit dieser Effekt gemindert wird. Da jeder Dipol zum Senden und Empfangen verwendet wird, stellt dieser Ansatz eine Halbduplex-Übertragung dar.

4.2.2 Optische Kommunikation

Für die Kommunikation über kurze Reichweiten, wie zum Beispiel das kontaktlose Übertragen von Daten an eine Basisstation, bietet sich auch eine optische Lösung an. Dazu wurde ein optisches Modul entwickelt, das in Abb. 9 dargestellt ist. Die Datenübertragung ist mittels OFDM-moduliertem Licht realisiert,



Abb. 9:
Optisches Kommunikationsmodul mit räumlich getrennter Sender- und Empfängerdiode

das kegelförmig mit einem Abstrahlwinkel von 9° gesendet wird. Andere Linsen zur Strahlformung stehen ebenfalls zur Auswahl. Das schwache empfangene Signal wird über einen elektrischen Verstärker um 80 dB angehoben und variabel weiter verstärkt, bevor die Demodulation durchgeführt wird. Die vollständige Beschreibung des optischen Kommunikationsmoduls findet sich in Ardelt et al. (2017).

4.2.3 Akustische Kommunikation

Die Verfahren zur akustischen Kommunikation sind auf große Reichweiten bis zu mehreren Kilometern ausgelegt und erreichen daher nur geringe Datenraten. Zur Evaluierung einer akustischen Kommunikation mit erhöhter Datenrate bei mittleren Entfernungen < 100 m wurde im Projekt BOSS-COGNET von der FH Lübeck ein akustisches Kommunikationsmodul entwickelt, welches ein

Frontend für den Betrieb mit relativ breitbandigen Transducern beinhaltet. Aufgrund der im Vergleich zu den anderen Verfahren schmalen akustischen Bandbreite heute verfügbarer Transducer und aufgrund der heutzutage technisch fortgeschrittenen, existierenden akustischen Modems wurde dieser Ansatz jedoch nicht zur Umsetzung einer Nahbereichskommunikation weiterverfolgt.

5 Umsetzung der Autonomie

Das autonome Verhalten der Mantas setzt voraus, dass sie ein Verständnis für ihre Umgebung entwickeln. Dazu dienen die Sensorik und deren Fusion zum intelligenten Gesamtsystem. Die Sensorik besteht aus USBL und Akustikmodem, Altimeter, Front-, Side-Scan- und Multibeam-Sonar, DVL, 3D-Videosystem, CTD-Sonde und Multiparametersonde. Die Daten der Sensoren werden

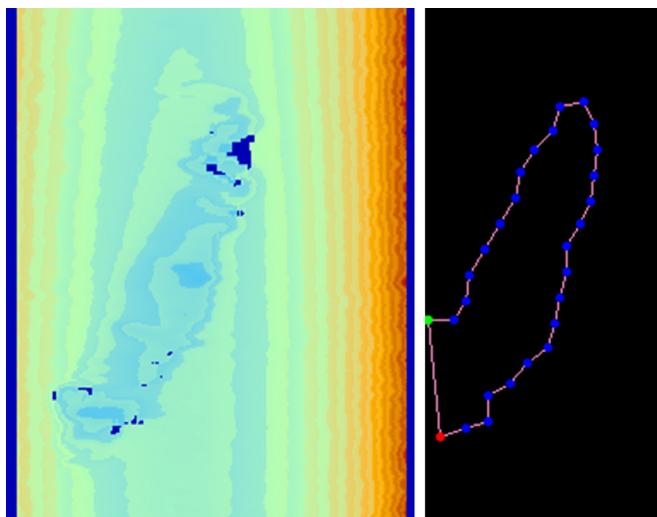


Abb. 10:
Verarbeitung
von Multibe-
am-Sensordaten
zur Merkmals-
extraktion

einem Gesamtbild verarbeitet und fusioniert. Eine Übertragung der rohen unverarbeiteten Sensorwerte zwischen den Fahrzeugen oder zu einer Basisstation ist nicht zielführend, auch wenn eine hohe Datenrate zur Verfügung steht. Statt den Daten tauschen die Fahrzeuge Informationen aus. So wurde eine Merkmalsextraktion aus Sonarbildern implementiert, wie in Abb. 10 gezeigt. Diese Arbeit und darauf aufbauende Lösungen wurden wissenschaftlich von Sion et al. (2016) und von Constaple et al. (2017) publiziert.

Aus den Rohdaten des Sonars wird ein Bild erzeugt (Bild links). Durch Anwendung von Glättungsfilters und Kantendetektion wird schrittweise automatisiert

eine Kontur extrahiert. Dann werden auf der erzeugten Kontur äquidistant Koordinaten verteilt (blaue Punkte im Bild rechts) und die Kontur an Start- (grüner Punkt im Bild rechts) und Endpunkt (roter Punkt im Bild rechts) geschlossen. Der Vorteil der Merkmalsextraktion besteht darin, dass diese Daten als diskrete Eingabe für eine weitere maschinelle Verarbeitung effizient aufbereitet sind.

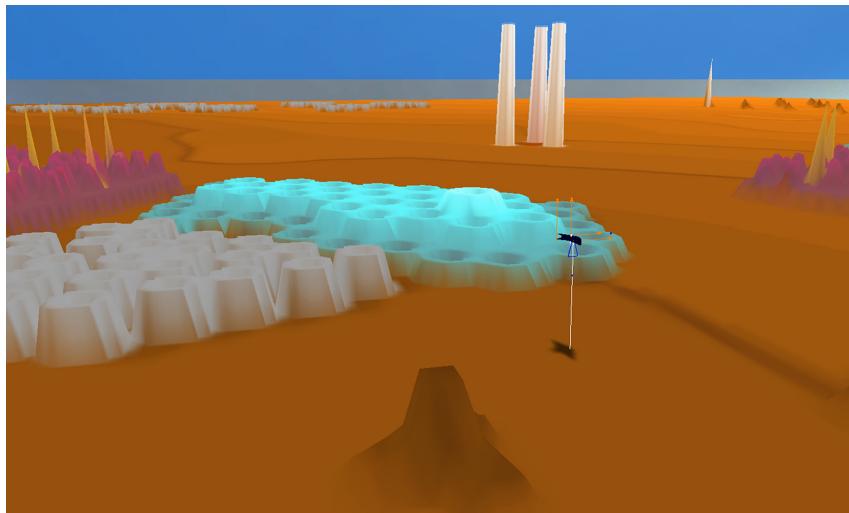


Abb. 11: Simulation des Riffs Nienhagen und eines Mantas mit MARS

Anhand der Koordinaten kann beispielsweise die Größe und Lage bzw. Orientierung der erkannten Kontur abgeschätzt und leicht übermittelt werden.

Zur Vorbereitung der Erprobung der Mantas in dem künstlichen Riff Nienhagen in der Ostsee wurde für den Marine Robotics Simulator (MARS) ein dreidimensionales Modell des Riffs erstellt, welches dessen Wassertiefe und Struktur abbildet. Das Riff selbst hat eine Fläche von etwa 200×200 Quadratmetern, die simulierte Umgebung ist 300×300 Quadratmeter groß. In Abb. 11 sind folgende Strukturen zu sehen: Ein großer 6-Tonnen-Tetrapode im Vordergrund und weitere rechts oben im Hintergrund, weiße Riffkegel vorne links, dahinter hellblaue Betonringe in 1 bis 3 Lagen. Weitere Riffkegel sind im Hintergrund links zu sehen. Die pinken Strukturen stellen in bis zu drei Lagen gestapelte 2-Tonnen-Tetrapoden dar, die einzelnen gelben Spitzen repräsentieren an Ketten befestigte Auftriebskörper. Relativ zentral steht auf drei Säulen die Beobachtungsplattform. Ungefähr bildmittig ist in schwarz einer der Schwarm-Mantas in der Simulation zu sehen.

6 Evaluation der Unterwasserkommunikation

Für die optische und elektrische Datenübertragung wurde der Einfluss der Entfernung zwischen Sender und Empfänger, sowie der Einfluss der Winkelausrichtung auf die Rahmenfehlerrate und auf die maximale Datenrate untersucht.

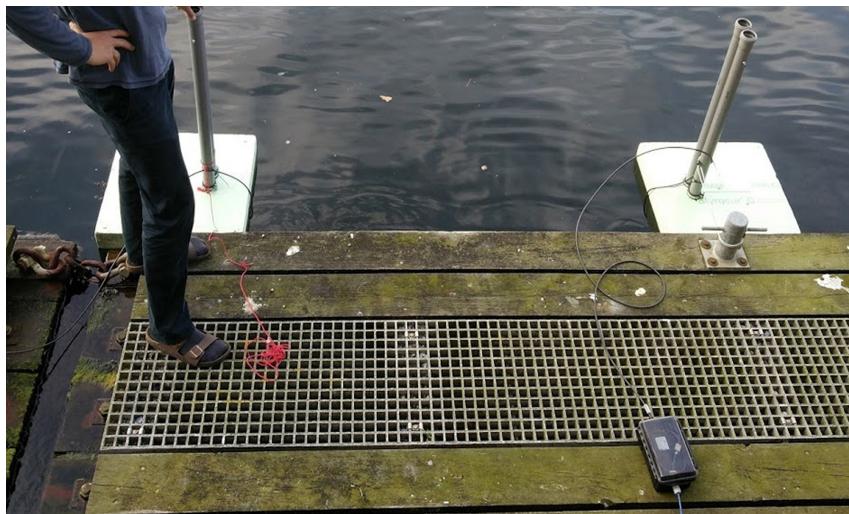


Abb. 12: Messaufbau der Untersuchung, bei dem Sender und Empfänger mittels Bojen im Wasser platziert sind.

Hierzu wurde der Empfänger an einem festen Ort und mit definierter Ausrichtung fixiert. Der Sender wurde vom Empfänger um die Entfernung d weg bewegt bzw. um den Winkel ϕ rotiert. Abb. 12 zeigt den Messaufbau, in dem die zwei Kommunikationsmodule senkrecht in zwei Meter Tiefe installiert wurden, und Abb. 13 veranschaulicht die Orientierung zwischen Sender und Empfänger mit den Parametern d und ϕ . Zusätzlich wurde der Einfluss von Störungen durch ruckartige, periodische Bewegungen bei der optischen Datenübertragung untersucht.

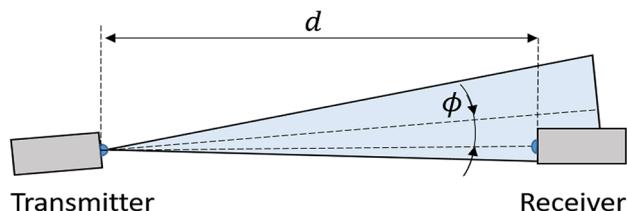


Abb. 13:
Orientierung
von Sender und
Empfänger bei der
Untersuchung der
Datenübertragung

6.1 Elektrische Feldkommunikation

Das elektrische Verfahren erreicht eine Datenrate von bis zu 1 Mbit/s bei kurzer Distanz < 1 m.

Die Messungen in der trüben Ostsee zeigen für eine Trägerfrequenz und Bandbreite von jeweils 200 kHz eine maximale Reichweite von mindestens 2 m, bei einer Empfangsdatenrate von bis zu 160 kbit/s und einer Ausrichtung von 0°, 30° und 60°. Über eine Entfernung von 4 m wird die gleiche Datenrate bei einer Ausrichtung von 0° erreicht. Für eine niedrigere Trägerfrequenz und Bandbreite und damit reduzierter Empfangsdatenrate von maximal 50 kbit/s werden 6 m auch bei einer nicht optimalen Ausrichtung der Dipole (Winkel $\phi = 30^\circ$) erreicht. Bei einer Ausrichtung von 90° zwischen Sender und Empfänger liegen die Empfangselektroden nahezu auf einer Äquipotenziallinie und die resultierende Empfangssignalstärke fällt sehr stark ab. Die Datenübertragung ist dann fehlerhaft.

Ein weiterer Test im Schwimmbad (Abb. 14) zeigt, dass mit dem Ansatz der elektrischen Feldkommunikation ein Video mit einer Datenrate von 250 kbit/s über eine Distanz von mehr als 8 m zu übertragen ist, wobei im Vergleich zu den oben beschriebenen Messungen der Salzgehalt im Schwimmbad dem von Süßwasser gleicht. Tab. 1 zeigt abschließend einen Überblick der Kenndaten des elektrischen Kommunikationsmoduls.

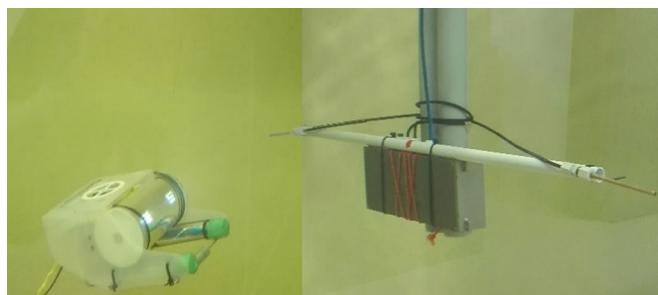


Abb. 14:
Darstellung der
elektrischen
Feldkommu-
nikation mit
einem instal-
lierten Elekt-
roden-Dipol
(rechts)

Tab. 1: Zusammenfassung der Kenndaten

Parameter	Wert
Datenrate	1 Mbit/s max.
Reichweite	10 m max.
Leistungsaufnahme	20 W max.
Formfaktor	(310 × 115 × 60) mm ³

6.2 Optische Kommunikation

Das optische System erreicht eine Datenrate von bis zu 2 Mbit/s über eine Distanz von 4 m in Luft und in klarem Wasser, wobei die Übertragungsgeschwindigkeit nur durch die Umsetzung der Signalverarbeitung limitiert ist.

Der Test in trübem Wasser ergibt folgendes Ergebnis: Für die Datenübertragung bei einer Distanz von 2 m kann 16 QAM genutzt werden. Bei einer Distanz > 2 m kann mit QPSK fehlerfrei übertragen werden. Die maximale Datenrate bei erfolgreichem Empfang beträgt im Fall von 16 QAM ca. 900 kbit/s und bei einem Wechsel auf QPSK ca. 540 kbit/s, jeweils ohne Vorwärtsfehlerkorrektur. Die Messungen zeigen, dass auch bei einer Abweichung von bis zu 20° vom optischen Lot alle Rahmen erkannt werden. Der Abstrahlwinkel des Senders ist zwar durch die optische Linse auf 9° begrenzt. Die Trübung des Wassers führt jedoch zu einer breiten Streuung des Lichtes, sodass Werte bis zu 20° erreicht werden konnten. Die maximale Distanz für die Übertragung liegt bei diesem Test bei 6 m. Hierbei geht trotz eingeschalteter Vorwärtsfehlerkorrektur ein Teil der Rahmen verloren (<30 %). Die Datenrate beim Empfänger beträgt jedoch noch ca. 350 kbit/s.

Die Übertragung wird bei ruckartigen Bewegungen des Senders und Empfängers trotz des geringen optischen Abstrahlwinkels von 9° nicht beeinträchtigt. Die Robustheit der optischen Datenübertragung bei Bewegung des Senders oder Empfängers wird in weiterführenden Versuchen in der Zukunft bei Bedarf genauer untersucht.

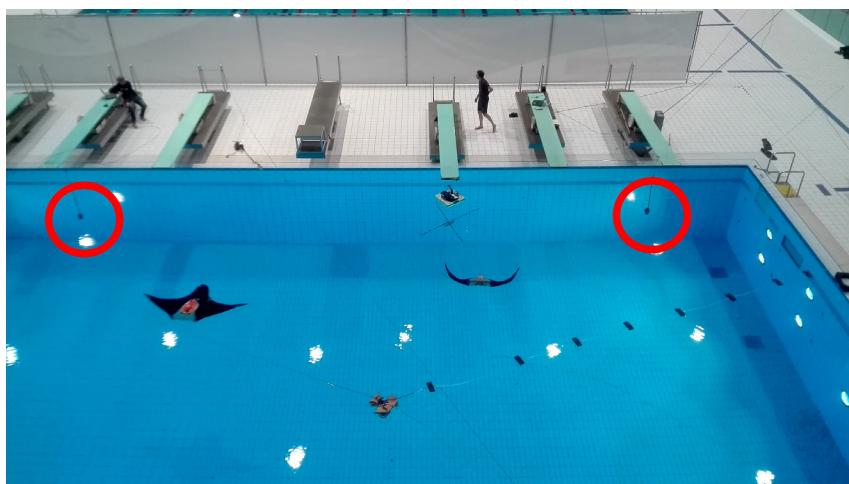


Abb. 15: Messungen im Schwimmbad mit Manta, in roten Kreisen markierte optische Sender und Empfänger

Tab. 2: Zusammenfassung der Kenndaten

Parameter	Wert
Datenrate	2 Mbit/s max.
Reichweite	20 m max.
Leistungsaufnahme	20 W max.
Formfaktor	(310 × 115 × 60) mm ³

Messungen im beleuchteten Schwimmbad ([Abb. 15](#)) mit klarem Wasser zeigen, dass mit dem Ansatz der optischen Kommunikation mit dieser Implementierung unter Nutzung von 64 QAM eine Datenrate von 2 Mbit/s über eine Distanz von 4 m zu

erreichen ist. Bei einer Entfernung von 15 m sind mit QPSK noch ca. 500 kbit/s erreichbar. [Tab. 2](#) zeigt abschließend die Kenndaten des optischen Kommunikationsmoduls. Eine Charakterisierung des Kanals und der Reichweite bezogen auf optische Signale unter Wasser sind in Mackenberg et al. (2014) und in Pelka et al. (2016) zu finden.

7 Zusammenfassung und Dank

Die hier dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Projekts BOSS-COGNET zusammen mit den Firmen Sea & Sun Technology GmbH (Trappenkamp) und EvoLogics GmbH (Berlin) erarbeitet. In dem Teilprojekt BOSS Cognet ist ein Unterwasser-Intranet zwischen Fahrzeugen und Fahrzeug/Infrastruktur geschaffen worden, das sich in das Internet integrieren lässt. Als Technik für die Unterwasserübertragung wurde eine optische und elektrische Lösung erarbeitet, die eine hohe Datenrate robust über mehrere Meter erreicht und zusammen mit der Vernetzung und der Sensorik des Fahrzeugs die Basis für die Autonomie des Schwarms der AUVs bildet. Das Projekt BOSS wurde gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Förderkennzeichen BOSS COGNET: 03SX361C).

Literatur

- Ardelt, G.; Mackenberg, M.; Hellbrück, H. (2017): Wireless Underwater Communication via Analog OFDM Modulated Light. *Proceedings of the International Conference on Underwater Networks & Systems*, 2017, 18:1–18:3.
- Ardelt, G.; Mackenberg, M.; Markmann, J.; Esemann, T.; Hellbrück, H. (2016): A Flexible and Modular Platform for Development of Short-Range Underwater Communication. *The Eleventh International Conference on Underwater Networks and Systems*.
- Constapel, M.; Teubler, T.; Hellbrück, H. (2017): A syntactic approach to wreck pattern recognition in sonar images. *Student Conference on Medical Engineering Science*. GRIN, Mar-2017.

- Esemann, T.; Ardel, G.; Hellbrück, H. (2014): Underwater Electric Field Communication. Proceedings of the 9th ACM International Conference on Underwater Networks & Systems (WUWNET).
- Mackenberg, M.; Janicke, C.; Esemann, T.; Hellbrück, H. (2014): Software Defined Transceiver for Underwater Communication. Proceedings of the European Workshop on Testbed based Wireless Research.
- Pelka, M.; Mackenberg, M.; Funda, C.; Hellbrück, H. (2017): Optical Underwater Distance Estimation. Oceans MTS/IEEE.
- Sion, M.; Teubler, T.; Hellbrück, H. (2016): Embedded Multibeam Sonar Feature Extraction for Online AUV Control. Oceans'16 MTS/IEEE Shanghai.
- Teubler, T.; Anschütz, M.; Hellbrück, H. (2016): Testbed for Development of Networked Autonomous Underwater Vehicles. Oceans'16 MTS/IEEE Shanghai.
- Teubler, T.; Hellbrück, H. (2016): Design of Expert Systems for Autonomous Underwater Vehicle Control. Oceans'16 MTS/IEEE Monterey, CA, USA.
- Teubler, T.; Shuang, L.; Hellbrück, H. (2015): Integrating Expert System CLIPS into DUNE for AUV Control. Oceans'15 MTS/IEEE Genova.

Kontakt

Prof. Dr. Horst Hellbrück
Fachhochschule Lübeck
Mönkhofer Weg 239, 23562 Lübeck
hellbrueck@fh-luebeck.de

Limits von AUV und ROV bei Missionen im Hochseebereich – ein kurzer Überblick über die Theorie, die Realität und die Risiken

Gerrit Meinecke

1 Einleitung

In den Ankündigungen internationaler Konferenzen und in den Broschüren etablierter meerestechnischer Produktlieferanten werden häufig Unterwasserfahrzeuge (UW-Fahrzeuge) im Einsatz gezeigt, oftmals in rauer See. In den Zeitschriften der Maritimen Gemeinschaft wird gezeigt, dass immer kompaktere und leistungsfähigere Elektronikkomponenten ihr Anwendungsfeld in hoch-integrierten Systemen finden und auch in das Maritime Umfeld Einzug halten. Ein Beispiel dafür sind die wachsenden Anwendungen im Bereich der autonomen Messsysteme, sei es als *Autonomous Surface Vessels* (ASV), im Zusammenspiel mit einem *Autonomous/Unmanned Underwater Vehicle* (AUV, UUV), als *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) – sog. Drohnenanwendung – oder sogar gekoppelte Einsätze aller zuvor genannten Systeme. Motiviert durch Wettbewerbe großer Ölkonzerne werden Fahrzeugkombinationen aus AUV/UUV, ASV und UAV für den Langzeiteinsatz entwickelt und als Prototypen gebaut.

Es drängen sich die Fragen auf: ist das alles mittlerweile Standard, ferngesteuerte und autonome Unterwasserfahrzeuge einzusetzen, bzw. ist das mit der heutigen Technik so einfach geworden? Der nachfolgende Text beschreibt einige grundsätzliche Rahmenbedingungen, die beim Einsatz von Unterwasserfahrzeugen nicht unbeantwortet sein sollten, bevor sich ein Nutzer dafür entscheidet. Im folgenden Text wird dabei häufig konkret das AUV als UW-Fahrzeug adressiert. Viele der genannten Aussagen sind auch für die Fahrzeugklasse der ROVs zutreffend, auch wenn beide Klassen hier, aufgrund ihrer spezifischen Komplexität, nicht im Detail behandelt werden können.

2 Warum gibt es so viele Fahrzeuge?

Selbst bei oberflächlicher Recherche fällt auf, dass es sehr viele unterschiedliche Typen von Tauchfahrzeugen gibt, besonders im AUV-Segment – wobei damit nicht die Tauchtiefen gemeint sind, sondern vor allem die Formen. Betrachtet

man die wissenschaftliche Payload der UW-Fahrzeuge stellt sich die Frage: warum reicht nicht einfach ein ROV, es offeriert doch deutlich mehr Potenzial an Zuladung (*payload*) und möglicher Einsatzszenarien?

Bei näherer Betrachtung wird klar, dass viele Fahrzeuge für ihren Einsatzzweck optimiert sind. Es ist eingängig, dass ein 3 kn schnelles, torpedoförmiges AUV sehr viel schneller und effizienter eine Bathymetrische Kartierung anfertigen kann, als ein ROV, welches, mit den gleichen Sensoren bestückt, ebenfalls einen vorgegebenen *track* abfahren kann, allerdings nur mit max. 0,5 kn Geschwindigkeit. Im letzteren Fall hat das ROV hydrodynamisch eine sehr große Stirnfläche im Wasser zu bewegen, die auch noch durch die Fläche des langen Versorgungskabels vergrößert wird.

Erweitert man den Faktor Geschwindigkeit und hydrodynamisch wirkende Fläche durch die Betrachtung der Stabilität, d.h. wie stabil in Bezug auf die Bewegungsrichtungen *Roll*, *Pitch* und *Yaw* liegt mein Fahrzeug im Wasser, kommen bei der Massenverteilung der UW-Fahrzeuge die Faktoren *Center of Mass (CM)* und *Center of Buoyancy (CB)* in die Betrachtung. Beim ROV liegen sie in der Z-Richtung (Hochachse) typischerweise deutlich auseinander, d.h. vereinfacht ist der Auftriebsblock „oben“ und das Gewicht „mitte/unten“ (Beispiel *Workclass ROV, ca. 100 cm*). Beim AUV liegen sie jedoch nur wenige cm weit auseinander. Aus diesem Grund ist ein AUV um alle Achsen sehr agil zu steuern aber zugleich labil im Lageverhalten; ein ROV hingegen vergleichsweise träge zu steuern aber stabil im Lageverhalten. Die letztere Eigenschaft des ROVs wird deshalb typischerweise bei der Beprobung vor Ort *on site* ausgenutzt, dort wo mit Manipulatoren schwere Proben genommen oder Geräte ausgesetzt werden. Aufgrund der stabilen Massenverteilung kann ein ROV das kompensieren, ohne deutlich zu „kippen“. Für ein AUV wäre dies ohne einen Massenausgleich (*buoyancy-engine*) undenkbar.

Nehmen wir das torpedoförmige AUV und das klassische *Workclass ROV* als jeweilige Endpositionen in der *CM*- und *CB*-Abwägung, zugleich die erste Annäherung in der Agilitäts-/Stabilitätsauslegung eines UW-Fahrzeuges, dann erklären sich je nach Anwendung die unterschiedlichen Formen der UW-Fahrzeuge – viele haben ihren speziellen Anwendungsfall. Ein AUV mit sehr guter Stabilität im *Roll*, aber zugleich guter Agilität im *Pitch* und *Yaw* (als Nutzerforderung), hätte dann ein *Flatfish-Design*. Soll es lagemäßig ein besonders stabiles, zugleich langsam fahrendes AUV sein, dann empfiehlt sich ein *Hochkant-Design* (Rümpfe übereinander).

Die **Abbildungen 1 bis 6** zeigen exemplarisch typische Vertreter der Fahrzeugklasse AUV. Jedes dieser AUVs hat seine Vorteile, abgestimmt auf den jeweiligen wissenschaftlichen Einsatzzweck.

Die genannten Stabilitätswünsche wirken sich aber auch auf die notwendigen Größen der Kontrollflächen des UW-Fahrzeuges aus (Höhen-, Seitenruder).



Abb. 1: Klassisches torpedoförmiges Tiefwasser-AUV, Autosub 6000 (National Oceanography Centre; www.noc.ac.uk; GB).



Abb. 2: Ellipsenförmiges AUV DEPTHX mit extrem umfangreicher Spezialsensorik (DEep Phreatic THERmal eXplorer; www.stoneaero-space.com; USA).



Abb. 3: Flatfish-AUV ARTEMIS für Untereis-Einsätze (Autonomous Rovers/airborne-radar Transects of the Environment beneath the McMurdo Ice Shelf; www.stoneaerospace.com; USA).



Abb. 4: Sehr lagestabile, langsam fahrendes AUV JAGUAR (Woods Hole Oceanographic Institution; www.whoi.edu; USA).

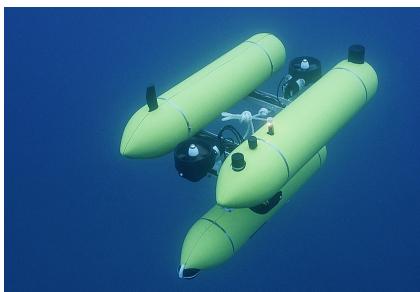


Abb. 5: Drei-Rumpf-AUV GIRONA 500, IQUA Robotics (Tecnològic UdG, Edifici Giroem-prèn Tecnològic, Girona; Spanien).



Abb. 6: Tiefwasser-AUV SENTRY (Woods Hole Oceanographic Institution, www.whoi.edu; USA).

Diese sind nur sinnvoll wirksam, wenn sie hydrodynamisch entsprechend angeschrömt werden (d. h. das AUV muss sich bewegen). Hieraus ergeben sich minimale Geschwindigkeiten für ein AUV, mit denen es noch kontrolliert Lageänderungen durchführen kann. Soll das AUV sehr langsam fahren, müssen diese Ruderflächen durch Propeller (*thruster*) ersetzt/erweitert werden (energetisch ungünstig), seitliches Versetzen (*hovern*) erfolgt ebenfalls über Propeller. Soll es stehen bleiben können, müssen Propeller den Auftrieb (*buoyancy*) kompensieren (energetisch ungünstig) – oder eine aktive Auftriebsregelung übernimmt die Kompensation (*buoyancy engine*). Grundsätzlich gilt, je besser ein AUV in seiner Hydrodynamik und in seinen Massenverhältnissen optimiert ist, umso effizienter ist es in der Energieverwendung und umso länger können seine Einsatzmissionen in Relation zum Energievorrat ausgelegt werden.

Vereinfacht kann gelten: das AUV ist das UW-Fahrzeug für große Flächen und Distanzen, es ist limitiert in seiner Leistung, dennoch schnell, kabelungebunden und autonom. Ein ROV ist das UW-Fahrzeug für die Arbeiten „auf der Stelle“ und mit ihm können viele Dinge deutlich einfacher durchgeführt werden, als mit einem AUV. Es ist langsamer als ein AUV, aber es kann große, unformige Geräte mitführen. Das ROV bezieht nahezu endlose Energie vom Versorgungsschiff und kann deshalb mit sehr viel Schubkraft durch die *thruster* Auftrieb/Anströmung und hydrodynamische Unzulänglichkeiten kompensieren. Die Kabelverbindung zum Trägerschiff, im Gegensatz zum autonomen AUV, gewährleistet die volle Fahrzeugkontrolle durch den Nutzer (*human in the loop*) – wie gewichtig und weitreichend dieser Unterschied im realen Einsatz ist, können wahrscheinlich nur Nutzer beider Systeme bewerten.

Abstrakt formuliert kennt ein Standard AUV im operationellen Einsatz zwei Modi: „geht“ oder „geht nicht“. Der letztere Zustand erfordert zwingend eine definierte Reaktion, andernfalls befindet sich das AUV in einem unkontrollierten Zustand. Beim ROV sitzt ein Mensch an der Bedienkonsole und kann Fehlerzustände auch unscharf bewerten, es werden auch Fehlerzustände erlaubt, wie „geht ein bisschen“ bzw. „ist nicht OK, aber ich kann noch weiterarbeiten“. Diese vermeintlich banale Unterscheidung macht AUV-Einsätze so kompliziert und ROV in der Fehlertoleranz deutlich einfacher.

Es hängt letztlich von der sorgfältigen Bewertung der Einsatzszenarien ab, um zu entscheiden, welche Fahrzeugklasse besser und effizienter die geplanten Arbeiten erledigen kann – ROV oder AUV.

3 Die Qual der Wahl – welches Fahrzeug benötige ich?

Sicherlich gibt es kein Fahrzeug, das alles „gleich gut kann“. Die Leistungsbandbreiten der UW-Fahrzeuge sind sehr unterschiedlich, die Beschaffungs- und

Betriebskosten ebenso. Am Anfang aller Beschaffungen sollte sich der Nutzer deshalb Fragen stellen, beispielsweise:

- Was will ich eigentlich konkret messen, was sind meine Sensoren?
- Wo will ich mein Gerät einsetzen?
- Was ist meine Erwartungshaltung an das System?
- Wie sehen meine Betriebskosten aus?
- Mit welchem Personal kann/muss ich das UW-Fahrzeug betreiben?
- Welche Infrastruktur benötige ich, um das UW-Fahrzeug nutzen zu können?

Einige Fragen sind vermeintlich leicht zu beantworten, andere weniger. Ist es die Aufgabe, eine hochauflösende Bathymetrische Kartierung mit einem *Multibeam Echosounder (MBES)* durchführen, so kann man das natürlich mit einem AUV durchführen. Die Argumentation gemäß der Verkaufsbroschüre: es ist ein autonomes System, programmieren, aussetzen, messen lassen, nach Stunden (am Ende der Mission) einsammeln, Daten auslesen, re-programmieren, elektrisch Laden und neu einsetzen.

Ist das die Realität? Erlaubt mein Einsatzszenario vor Ort so einen Einsatz wirklich, oder habe ich möglicherweise folgende Einschränkungen: Freizeitskipper auf dem See; Schwimmer im Wasser; Fischer, die Stellnetze ausbringen; Berufsverkehr und Fähren, die hin und her fahren; wechselnde Wetterbedingungen; starke Strömung, Ebbe und Flut; starke Trübung im Wasser; was passiert, wenn das AUV unerwartet auftaucht? Erlaubt das rechtliche Regelwerk den unbeobachteten Einsatz eines Autonomen Unterwasserfahrzeuges und wie sieht der mögliche Versicherungsschutz aus? All diese Einschränkungen können einen Einsatz in einem kleinen Boot, mit zwei Personen, deutlich effizienter und realistischer vermuten lassen, als mit einem AUV.

Die kritische Betrachtung des Einsatzzwecks und die eigene Erwartungshaltung des Nutzers stehen deshalb am Anfang der Betrachtung. Eigene Erfahrungen haben gezeigt, dass die namensgebende autonome Arbeitsweise noch ihre Grenzen hat, denn sie hängt hauptsächlich von der Risikobereitschaft des Operateurs ab. Betrachten wir ein Standard AUV, spricht man nicht von künstlicher Intelligenz, sondern von automatisierten Geräten. Technisch mögliche Fehler des Fahrzeuges werden durch nutzerbestimmte Verhaltensweisen behandelt, die im Fahrzeugbetriebssystem abgelegt sind (sog. *Fault-Response-Table, FRT*). Der Nutzer bestimmt, in welchen technisch-operationellen Grenzen sein UW-Fahrzeug mit möglichen Fehlern umgeht. Einfach ausgedrückt: werden alle Fehler mit einem Abbruchkriterium definiert (geringes Einsatzrisiko), dann ist das AUV wahrscheinlich häufig an der Wasseroberfläche und wenig Einsätze sind erfolgreich. Werden alle Fehler ignoriert (hohes Einsatzrisiko), dann hat das AUV keine technisch-operationellen Grenzen und geht sehr wahrscheinlich relativ schnell verloren.

In den letzten Jahren sind sehr viele Bemühungen unternommen worden, dem AUV mehr Missionsstabilität zu geben, d.h. eine größere Fehlertoleranz einzubauen. Eigenständige Softwaremodule (*backseat-driver*) übernehmen in Ergänzung zum bestehenden Operationssystem auf dem AUV Missionsentscheidungen, beispielsweise im Fehlerfall, im Rahmen von Interaktionen mehrerer AUVs (*swarms*) oder im Fall eines ereignisgesteuerten Missionsablaufs (*event-triggered*).

Die Bewertung des Einsatzrisikos ist ein komplexes Feld, dennoch sollte sie jeder Nutzer intensiv führen – hier kommt die Erfahrung der Betreiber besonders zum Tragen. Es sollte von Beginn an Klarheit darüber herrschen: sobald ein UW-Fahrzeug im Wasser einsetzt wird, akzeptiert der Betreiber das Risiko der Beschädigung bis hin zum Totalverlust des Fahrzeuges. Das Verlustrisiko ist geringer zu bewerten, wenn man in einem flachen See arbeitet (Wassertiefe und Suchgebiet sind begrenzt) und besonders hoch, wenn man im offenen Ozean arbeitet.

Die Beschaffungskosten für ein AUV oder ROV sind unterschiedlich und gehen von 15.000 Euro bis in den Bereich mehrerer Millionen Euro – aber auch verlorene 15.000 Euro sind schwer zu rechtfertigen, wenn ein Risiko falsch oder gar nicht bewertet wurde. Zweifelsohne passiert dies immer wieder. Vermarktet werden vorzugsweise „Erfolge“, nicht gezeigt die vielen „Fehlversuche“. Entsprechend sollten spektakuläre *single-shot-missions* von UW-Fahrzeugen bewertet werden, die mit hohem technischen Aufwand und vollem Risiko in Szene gesetzt wurden und wenig mit der normalen Realität zu tun haben. Bei ausgewählten wissenschaftlichen Fragestellungen kann diese Aufwands-/Risikoabschätzung ihre Berechtigung haben, nur ist das nicht der Standard.

Eine angemessene Personalausstattung ist notwendig, damit UW-Fahrzeuge sinnvoll eingesetzt werden können. Ausbildung und Umfang des Personals hängen stark vom ausgewählten System ab, d.h. je offener die Struktur des Fahrzeuges (technisches Konzept, Betriebssystem, Schnittstellen), um so kompetenter muss der Personalstamm ausgelegt werden. Stark gekapselte und abgeschottete Systeme (*black box*), zudem mit vielen proprietären Bauteilen bestückt, mögen eine hohe Einsatzsicherheit suggerieren. Der Nutzer hat wenige Eingriffsmöglichkeiten, er kann nicht eigenständig Sensoren integrieren oder das System erweitern, das erhöht die Einsatzsicherheit. Ein Nachteil: dies treibt die Betriebskosten des Fahrzeuges in die Höhe, da kaum Standardbauteile eingebaut werden können. Schnell wird für Ersatzteile und Support das Jahresgehalt eines Software-Ingenieurs erreicht. Der Nutzer entscheidet: will ich ein fertiges *tool*, optimiert für einen Einsatzzweck; oder will ich einen offenen Geräteträger, modular und erweiterbar.

Trotz immer leistungsfähigeren, kompakteren *Microcontrollern* und hoch integrierten Komponenten (z. B. *Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS*), sollte

deren Komplexität in der Konfiguration und in der Fehlersuche in UW-Systemen nicht unterschätzt werden – ohne adäquates Personal bleibt das UW-Fahrzeug ungenutzt an Deck stehen, da ein Fehler vor Ort nicht behoben werden kann und eine lang geplante Kampagne wird zum Totalausfall. Langjährige Einsatzfahrungen zeigen, dass sehr breit aufgestellte Personalkompetenzen (Elektronik, Software, *Engineering*, operationelles *Know-How*) für erfolgreiche Feldkampagnen mit UW-Fahrzeugen notwendig sind.

4 Technisch-operationelle Vorgaben

Die Auswahl des UW-Fahrzeuges hat große Auswirkungen auf die technisch notwendige Zusatzausstattung. Technisch gesehen funktioniert ein kleines Flachwasser-AUV (z. B. *REMUS 100*, *Kongsberg*) nicht zwingend anders, als ein für 600 m Arbeitstiefe konzipiertes AUV (z. B. *REMUS 600*, *Kongsberg*) – beide sind aus derselben Produktfamilie. Das *REMUS 100* wiegt nur 36 kg, während das *REMUS 600* schon 240 kg und das *REMUS 6000* (*Kongsberg*, 6000 m Tauchtiefe) schon 865 kg wiegen. Es ist offensichtlich, dass 36 kg Gewicht noch von einem Schlauchboot aus eingesetzt können (*live boating*), bei 240 kg erübrigts sich diese Überlegung – ein Hilfsmittel ist notwendig. In diesen Größenklassen und darüber hinaus ist der Zugriff auf ein Boot bzw. ein Trägerschiff notwendig.

Beim Einsatz größerer Systeme interagieren jetzt allerdings „das UW-Fahrzeug selbst“ und „das Trägerschiff“ miteinander. Diese vermeintlich triviale Aussage hat ihre Tragweite, denn der Arbeitsbereich direkt am Trägerschiff (Bordwand, Schiffsseite, Heckbereich) dürfte für den Einsatz eines UW-Fahrzeuges der riskanteste Bereich sein. Alle dem Autor bekannten AUV-Nutzer haben ihr AUV schon unter dem Trägerschiff hindurch geschickt – ungewollt wahlgemerkt! Ebenso haben alle ROV-Betreiber schon ihr ROV in äußerst bedrohlichen Situationen am Heck bzw. unter dem Heck des Trägerschiffes gesehen – leider gehen diese Situationen in der Nähe der Schiffspropeller nicht immer glücklich aus! Langjährige Erfahrung, kontinuierliches Training und Erfahrungsaustausch mit Kollegen sind absolut notwendig (*best practices*).

Die Freibordhöhe des Trägerschiffes, sowie der vorgesehene Aussetzort (Mittschiffs, Achtern) beeinflussen erheblich das Einsatzszenario. Das wissenschaftliche Zielgebiet des UW-Systems, z. B. Binnensee, Flachwasser oder Hochsee, definiert im Zusammenspiel mit dem Trägerschiff die Auswahl des Aussetzsystems (Schiffskran; Rampe; spezielles *Launch and Recovery System*, *LARS*). Die Wetterbedingungen entscheiden letztlich häufig den Einsatz des UW-Systems (ja/nein). Dies ist immer die Kombination aus Wind/Wellen, und wie ein Schiff auf Position gehalten werden kann. Ebenso unter der banalen Vorgabe, dass ein

UW-Fahrzeug nicht nur ausgesetzt, sondern nach etlichen Stunden auch wieder sicher eingeholt werden muss – umso wichtiger ist der Blick auf die Wetterprognose.

Das ausgewählte Schiff wiederum hat eine Besatzung (Deckscrew, Nautiker), die im Normalfall mit dem Einsatzprocedere von UW-Fahrzeugen vertraut sein sollten – im ungünstigen Fall, nicht vertraut sind. Weitreichende Auswirkungen beruhen, neben der technischen Qualität des Trägerschiffes (z. B. *Dynamic Positioning, DP*), auch auf der Qualität der Besatzung, d. h. traversierende Fahrweise, Anfahren von Objekten im Wasser, Lee-machen, Arbeiten mit Leinen unter Last oder das Hieven und Fieren schwerer, schwingender Lasten mit dem Kran sind alltägliche Routine. All die zuvor genannten Punkte gehen in die allgemeine Risikobewertung mit ein.

Ist das UW-Fahrzeug im Wasser und verfügt es über keine Kabelverbindung, ist die akustische Unterwasserkommunikation (*Acoustic Underwater Modem*) vom Trägerschiff zum UW-Fahrzeug der einzige Kommunikationsweg, wofür ein separater Schallkopf (*transducer*) außenbords gehängt wird (oder im Schacht montiert ist). Diese akustische Kommunikation muss nicht zwingend *high-speed* sein, sie sollte vorrangig robust sein (z. B. langsam, aber verlässlich), da hierüber beispielsweise akustische Abbruchkommandos an das AUV geschickt werden können. Soll das UW-Fahrzeug im Unterwassereinsatz vom Nutzer verfolgt werden können (*monitoring, tracking*), dann ist der Einsatz eines ebenfalls akustisch arbeitenden *Long-Base-Line Systems (LBL)* oder eines *Ultra-Short-Base-Line Systems (USBL)* notwendig. LBL- und USBL-Systeme sind komplex (*UW-TX/RX Arrays* und *UW-Beacons*), sehr teuer in der Anschaffung und bedürfen geschultes Personal. Darüber hinaus sind entweder direkte Positions- und Lagedaten vom Schiff notwendig (*GNSS-, Heading- und Motion-Informationen*), oder separate Sensordaten müssen eingespeist werden. LBL- und USBL-Tracking-Systeme benutzen, ebenso wie schiffsgestützte Lote, häufig sehr ähnliche Trägerfrequenzen, wie die der akustischen Unterwasserkommunikation zum UW-Fahrzeug. Eine sorgfältige Abstimmung ist extrem notwendig, da ansonsten der Kommunikationsweg zum UW-Fahrzeug versperrt ist.

5 Typische Probleme

Unterwasserfahrzeuge haben eine Vielzahl von Sensoren, Steckverbindern, Elektronikkomponenten und viele metallische Verbindungen in Gehäusen, Halterungen und Rahmen Teilen. Korrosion durch Lokalelementbildung, undichte Stecker und nicht zuletzt mangelnde Qualitätskontrolle bei Herstellern – all das sind nach wie vor typische Probleme im Einsatz mit UW-Fahrzeugen. Erfahrungsgemäß benötigt jedes System seine Reifezeit und es gilt: immer wieder

einsetzen! Fehler werden so offensichtlich, können behoben werden und das System wird verlässlicher.

Eine andere Problematik ergibt sich, wenn Nutzer von terrestrischen Systemen die gleiche Erwartungshaltung an die Qualität der Georeferenzierung gewonnener Daten auch für UW-Fahrzeuge voraussetzen. Jeder Smartphone-Nutzer navigiert heutzutage weltweit problemlos und sicher dank GNSS oder Vergleichssystemen. Die Fahrzeugnavigation in der Tiefsee unterliegt einer anderen Realität: typischerweise nimmt ein AUV, mit einem korrekt kalibrierten Intertialsystem (*Inertial Navigation System, INS*), die letztgültige DGPS-Position auf einen Tauchgang mit. Im weiteren Tauchverlauf navigiert das AUV mit seinem INS über Stunden ausschließlich mittels klassischer Koppelnavigation, fortwährend rückrechnend auf diese Abtauchposition. Selbst die Unterstützung (*aiding*) des Kalman-Filters durch ein DVL (*Doppler Velocity Log*) als „Velocity update“ hat ihre physikalisch-mathematischen Grenzen. In einer Tiefwasseranwendung ist zudem das „Auftauchen zu einem Positionsupdate“ aus Effizienzgründen hinfällig (eine mögliche Option lediglich im Flachwasserbereich).

Die Nutzung eines USBL-Systems kann zur Korrektur der Position des UW-Fahrzeugs herangezogen werden – dennoch, typischerweise positioniert man in der Tiefsee im ± 2 m- bis 5 m-Bereich für den ROV-Betrieb. Der aktuelle Wasserkörper (Salzgehalt, Sprungschicht, Wassertiefe), die Qualität des USBL-Systems, dessen Wartung und die korrekte Einmessung der schiffsseitigen Referenzsysteme (*Motion Reference Unit, MRU* des Trägerschiffs, GPS-Antennen), beeinflussen erheblich die Qualität der Positionierung.

Ein AUV, welches über zehn Stunden am Boden taucht, wird erfahrungsgemäß über die zeitliche Drift des Intertialsystems einen Versatz der Positionierung von mehreren zehn Metern entlang seines *tracks* erfahren. Eine genauere Positionierung kann erreicht werden, wenn zuvor im Arbeitsgebiet ein LBL-Transponder-Netzwerk ausgelegt und eingemessen wird, was einen erheblichen finanziellen, logistischen und zeitlichen Aufwand darstellt und den Nutzer auch auf das aktuelle Einsatzfeld beschränkt.

Neben der Referenzierung bezüglich der geografischen Länge und Breite einer UW-Fahrzeug-Position, ist die korrekte Zuordnung der Wassertiefe bzw. der Arbeitstiefe, auf der sich ein UW-Fahrzeug befindet, ein ebenso umfassendes wie multivariates Problem. Terrestrisch haben wir typischerweise ein stabiles, eingemessenes Höhenmodell. Auf See ist unsere relative Referenzfläche die Meeresoberfläche, d. h. Tauchtiefe/Wassertiefe = 0. Sensorspezifische Charakteristika (PSI-Werte der Piezo-Druckaufnehmer), deren elektronisches Rauschverhalten, sowie die Korrektur auf Umgebungsdruck, in Kombination mit eingebundenen Umrechnungsformeln (Fofonoff et al. 1974, Unesco 1979), bieten ein großes Potenzial, um aus PSI-Druckwerten Wassertiefen zu berechnen. Typischerweise werden diese Daten anschließend mit Tiefenangaben verglichen, die

mit schiffsgestützten, akustischen Verfahren ermittelt wurden (Echolot, Schallprofile, CTD-Profile).

Technisch-operationell betrachtet stehen weltweit viele etablierte wissenschaftliche AUV- und ROV-Betreiber vor dem Umbau bzw. *Upgrade* ihrer alternden Systeme. Einerseits kommen permanent neue, hoch integrierte, sehr leistungsfähige Komponenten auf den Markt, die das UW-Fahrzeug verbessern können. Andererseits stellt der hohe Takt, mit der Elektronikkomponenten seitens der Hersteller aktualisiert werden, eine enorm große Herausforderung an die Ersatzversorgung bestehender System dar. Bei den Betreibern entsteht die Gefahr, für ihre Systeme keine Komponenten mehr beschaffen, bzw. in der Systemsoftware keine geeigneten Treiber mehr für neue Komponenten finden zu können. Der einzige Ausweg ist ein technisches *Upgrade* und ein komplett neues Betriebssystem – mit allen Vor- und Nachteilen.

Grundsätzlich hat der vermehrte Einzug von UW-Fahrzeugen in das maritime Forschungsfeld die Möglichkeiten zur Durchführung von Experimenten im Unterwasserbereich fundamental erweitert. Der Anspruch der wissenschaftlichen Kollegen an die Fahrzeugbetreiber wächst jedoch zeitgleich. Zunehmend mehr Experimente, komplexere und vor allem größere, schwerere Sensoren und Messgeräte müssen heutzutage am Meeresboden platziert werden. Tiefsee-Observatorien (z. B. *Neptune Canada* – www.neptunecanada.ca, *Ocean Observatories Initiatives (OOI)* – <http://oceanobservatories.org>) ermöglichen den Anschluss der Tiefsee-Sensoren an ein UW-Netzwerk und somit den direkten Zugriff auf die Steuerung von UW-Experimenten bzw. auf die Sensordaten, via Internet. Um hierfür große Gewichtslasten unter dem ROV transportieren zu können (*lift through capacity*), müssen die Betreiber der ROVs deren Leistungsvermögen erheblich ausbauen. Mit diesen Umbaumaßnahmen verändern sich jedoch auch langjährig bewährte Einsatzkonzepte, z. B. Einsatz des ROVs mit einem eingebundenen Gewicht (*depressor-weight*, z. B. ROV Jason, WHOI, USA). Diese Systeme können keine separaten Lasten transportieren und werden deshalb vermehrt auf *single-body* Systeme umgebaut (d. h. ohne *depressor*). Hierfür wird ebenfalls der Austausch des ROV-Versorgungskabel (*umbilical*) notwendig, was jedoch wiederum zu gewaltigen Problemen in der Handhabung der Kombination ROV, Versorgungskabel und Trägerschiff führen kann.

6 Resümee

Ferngesteuerte und autonome Unterwasserfahrzeuge haben in der Meeresforschung ein großes Potenzial. Mit ihnen kann der versierte Nutzer qualitativ hochwertige Daten aus schwer oder zuvor gar nicht zugänglichen maritimen Bereichen generieren. Die jetzt angeregte technische Umsetzung von satelliten-

gestützter, breitbandiger Telepräsenz auf deutschen Forschungsschiffen, wird noch eine weitaus größere Gemeinschaft an diesen Ergebnissen teilhaben lassen können. Es ist sicherlich nicht vermessen zu sagen, dass die unzähligen Einsätze von autonomen und ferngesteuerten UW-Fahrzeugen in den letzten 15 Jahren allumfassend zu einem gewaltigen Kenntnisgewinn in der Wissenschaft geführt haben.

Bei aller Faszination sollten jedoch die genannten Rahmenbedingungen beachtet werden, damit sie sinnvoll eingesetzt werden und sich die Investitionen auszahlen. Die Beschaffung der Geräte ist vergleichsweise einfach, die Inbetriebnahme ist bereits komplex, doch der Betrieb über zehn Jahre und länger ist eine Herausforderung. Als langjähriger Betreiber von UW-Fahrzeugen in der Tiefsee ist es meiner Auffassung nach noch lange kein Standard diese Geräte zu nutzen. Die technisch-operationelle Komplexität der Fahrzeuge macht es zudem nicht einfach sie erfolgreich einzusetzen. Unabhängig davon erlaubt die verfügbare Technik, gepaart mit personellen Ressourcen und großem Budget, extrem leistungsfähige und beeindruckende Prototypenfahrzeuge zu entwickeln – doch auch die sind weit vom Standard entfernt.

Literatur

- Fofonoff, N. P.; Hayes, S. P.; Milland, R. C. (1974): WHOI/Brown CTD Microprofiler: Methods of calibration and data handling. Woods Hole: Oceanographic Institution. II, 64 pp. (Techn. Rep. WHOI-74-89). Google Scholar.
- Unesco (1979): Ninth report of the joint panel on oceanographic tables and standards. Unesco Techn. Pap. mar. Sci. 30, pp. 32. Google Scholar.

Kontakt

Dr. Gerrit Meinecke
Universität Bremen – MARUM, Zentrum für Marine Umweltwissenschaften
Leobener Straße 8, 28359 Bremen
gmeinecke@marum.de

–RiverView® – Monitoring von Gewässerparametern an kleinen und mittleren Fließgewässern mit USV

Raimund Schwermann | Christoph Effkemann | Nicole Hein |
Gesa Kutschera | Jörg Blankenbach

1 Einleitung

Mit der Einführung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) sind der nachhaltige Gewässerschutz und der effiziente sowie schonende Umgang mit der Ressource Wasser in den Fokus der Gewässerbewirtschaftung gerückt. Insbesondere die Bereitstellung von gewässerbezogenen Informationen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung gewinnt zunehmend an Bedeutung. Während an großen Gewässern Daten an wenigen, stationären Anlagen erhoben werden, wird ein systematisches Monitoring an kleinen und mittleren Fließgewässern kaum durchgeführt, häufig nicht zuletzt aufgrund hoher Kosten, welche durch die Probenahme bei aufwendigen Begehungen entstehen. Eingehende Detailuntersuchungen wie etwa zum Durchmischungsverhalten flussabwärts von punktuellen Einleitern oder zur Wasserqualität in den Längs- und Querschnitten der Fließgewässer werden somit nicht im erforderlichen Ausmaß durchgeführt. Des Weiteren stellen häufiger auftretende Starkniederschlagsereignisse und daraus resultierende Anforderungen an das Hochwasserriskomanagement Fachbehörden vor immer größere Herausforderungen (Bronstert et al. 2017). Für die Vorhersage der Auswirkungen von meteorologischen Extremereignissen spielen gewässertopographische Daten über und unter Wasser eine zentrale Rolle, denn die hydrodynamische Modellierung sowohl von Hochwasserereignissen als auch von Gewässerrenaturierungsmaßnahmen stützen sich maßgeblich auf die geometrischen Informationen aus 3D-Geländemodellen. Darüber hinaus können diese Daten nutzbringend in die Erhebungen zur Gewässerstrukturgüte einfließen, denn hierbei werden zum großen Teil Sachverhalte mit überwiegend geometrischem Charakter beschrieben (z. B. Gewässerbettbreite und deren Varianz, siehe LANUV 2012).

Das Forschungsprojekt *RiverView*® hat sich das ganzheitliche Monitoring von kleinen und mittleren Fließgewässern zur Aufgabe gemacht. Als Teil der BMBF-Fördermaßnahme „Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland (ReWaM)“, die ihrerseits unter

dem Förderschwerpunkt „Nachhaltiges Wassermanagement (NaWaM)“ angesiedelt ist, werden u. a. Verfahren und Systeme für die regelmäßige Erfassung und Bereitstellung von spatio-temporalen Daten über die hydromorphologische, -chemische und -physikalische Situation in und an Fließgewässern entwickelt (Engels et al. 2016, Kutschera et al. 2018). In diesem Verbundprojekt sind neben drei Hochschulinstituten der RWTH Aachen noch vier Unternehmen als KMU sowie zwei nordrhein-westfälische Wasserverbände als Praxispartner eingebunden.

2 Trägerboot und Sensorik

Wesentliches Element von *RiverView*® bildet ein unbemanntes Messboot (USV, *Unmanned Surface Vehicle*), das mit unterschiedlichen Messsensoren für die bildliche, akustische und chemisch-physikalische Erhebung von Gewässerdaten ausgestattet ist. Das USV verfügt zudem über spezielle Sensorik für die Positionserfassung (GNSS/IMU), welche die unmittelbare Georeferenzierung der erfassten Daten sicherstellt und mit der die Gewässerbefahrungen ferngesteuert oder autonom durchgeführt werden können.

2.1 Trägerboot und Trailer

Das unbemannte Trägerboot (USV) – im Rahmen des Projektes als *RiverBoat* bezeichnet – ist als Katamaran konzipiert (Abb. 1). Das etwa 35 kg schwere *RiverBoat* zeichnet sich aus durch eine verhältnismäßig hohe Traglast für die mitgeführte Sensorik bei gleichzeitig kompakten Außenmaßen (Länge ca. 1,6 m, Breite ca. 1,2 m) und einem geringem Tiefgang (8 cm an den beiden Schwimmern).



Abb. 1: RiverBoat (USV)



Abb. 2: Trailer mit Winde

körpern), so dass die Voraussetzungen für die flexible Befahrung auch von kleinen Fließgewässern mit begrenzten Querschnitten gegeben sind.

Der unmittelbare Transport an und in das Gewässer kann von zwei Personen ohne weitere Hilfsmittel bewerkstelligt werden. Der Antrieb erfolgt mit zwei Elektromotoren zu je 450 W Leistung. Im gewöhnlichen Messbetrieb fährt das Boot mit einer Geschwindigkeit von 1,0 m/s; die in den beiden Schwimmkörpern verbauten Batteriepacks weisen dann eine Laufzeit von 6 bis 10 Stunden auf.

Optional kann während einer Messfahrt ein Trailer mitgeführt werden (Abb. 2). Dieser ist ebenfalls in Katamaran-Bauweise ausgeführt und verfügt über eine Winde, die über den Mess- und Steuerrechner des RiverBoats gesteuert werden kann. Die Winde kommt zum Einsatz, wenn beispielsweise an Staubereichen von Wehren detaillierte Tiefenprofile der Gewässergüteparameter erstellt werden sollen. Die Multiparametersonde (siehe Kap. 2.2) wird dann mit der Winde gezielt in vordefinierte Tiefen herabgelassen.

Die Route einer Messfahrt wird mit der Software NEPTUS geplant und überwacht. Hierbei handelt es sich um eine Entwicklung von LSTS (2018) speziell für die Steuerung von unbemannten Booten. Sie wurde im Rahmen des Projektes für das RiverBoat angepasst, so dass die Aufzeichnung der RiverView-Daten während einer Messkampagne kontinuierlich über ein mittels WLAN angebundenes Terminal kontrolliert werden kann. Die Kommunikation zwischen Messrechner und den Navigations- und Sensorkomponenten auf dem Boot erfolgt in einem TCP/IP-Netzwerk mit Client-Server-Architektur.

2.2 Sensorik

Die RiverView-Datenerfassung beruht auf einem Multi-Sensorsystem, wobei grundsätzlich zwischen der Datenerhebung über und unter Wasser unterschieden werden kann.

2.2.1 Überwasser-Mapping-System

Eine zentrale Komponente von *RiverView*® stellt die Sensorik für die bildliche Überwassererfassung dar, denn die fotografische Dokumentation der Gewässer- und Ufersituation bildet den zeitlichen und räumlichen Orientierungsrahmen für spätere Gewässerinspektionen vom Schreibtisch aus (Kap. 4).

Auf einer Trägerplattform, die für die Dauer einer Messfahrt auf dem Boot fest montiert wird, befinden sich als wesentliche Bestandteile der Überwassersensorik ein omnidirektionales Mehrkamerasystem, eine GNSS-Positionierungseinheit und eine MEMS-IMU (Inertialmesseinheit) (siehe Abb. 3). Gerätesteuerung und Datenaufzeichnung werden durch einen lüfterlosen Embedded

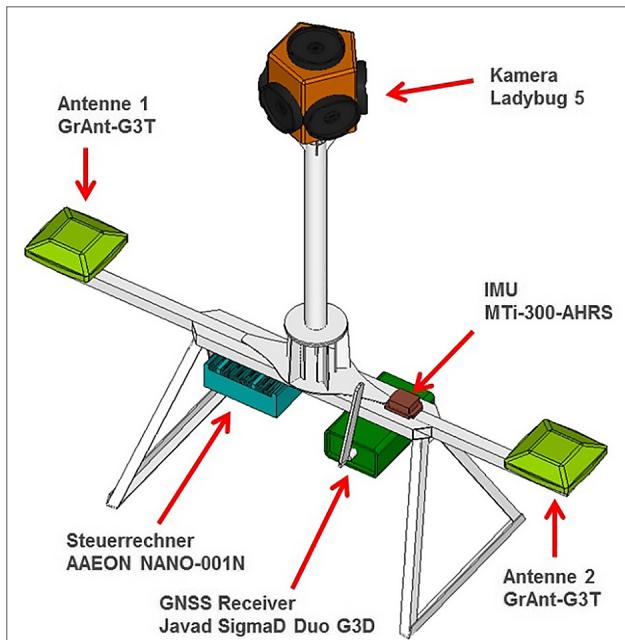


Abb. 3:
Multisensor-
plattform

Industrie-PC mit einem Intel Core i5-Prozessor (NANO-001N5350) bewerkstelligt, der für die rauen Bedingungen von Gewässeraußeneinsätzen ausgelegt ist und sich durch eine geringe Leistungsaufnahme (15 W) auszeichnet.

Die Kameraeinheit dokumentiert die Gewässer- und Uferkulisse lückenlos anhand von sechsteiligen Bildsätzen, die zu 360°-Panoramen aufbereitet werden. Anhand dieser Panoramen sind dann visuelle Inspektionen auch ohne örtliche Begehungen möglich. Für die Bildaufzeichnung wird das Kamerasytem

Ladybug 5 der Firma *Point Grey Research Inc.* eingesetzt (Abb. 4). Das Mehrkamerasytem setzt sich aus sechs Einzelkameras mit einer Brennweite von $f = 4,4$ mm zusammen, die jeweils eine Auflösung von 5 MP (2048×2448 Bildpunkte) aufweisen. Fünf Kameras sind in einem regelmäßigen Fünfeck angeordnet, so dass der ganze 360°-Horizont erfasst wird. Für die überwachten Gewässerabschnitte ist die sechste Einzelkamera hilfreich, die den Zenitbereich abdeckt. Die maximale Aufnahmefrequenz beträgt 10 Bilder/sec, wobei ein sechsteiliger Aufnahmesatz ca. 90 % der Umgebung dokumentiert.



Abb. 4: Ladybug 5

Für die Positions- und Orientierungsbestimmung des USV – und damit implizit auch für die Georeferenzierung der aufgezeichneten Gewässer- und Bilddaten – wird ein RTK-fähiges (*Real Time Kinematic*) Zwei-Antennen-GNSS (*GrAnt-G3T*) der Fa. Javad eingesetzt, das die Positionen mit einer Rate bis zu 5 Hz anhand von Zweifrequenz-Code- und Trägerphasenmessungen zu GPS- und GLONASS-Satelliten ermittelt. Das PPS-Signal des GNSS-Systems wird als Zeitbasis für alle aufgezeichneten Daten herangezogen. Ergänzt wird die Positionierungseinheit durch eine MEMS-IMU der Fa. Xsens. Die *MTi-300-AHRS* verfügt u. a. über je drei Accelero- und Gyrometer und ist für die Überbrückung von Signalausfällen des GNSS vorgesehen, zum Beispiel bei Brückenunterfahrungen, was allerdings aufgrund des relativ starken Driftverhaltens nur für kurze Zeitabstände (10 bis 20 sec) im geforderten Genauigkeitsrahmen möglich ist.

Die Georeferenzierung der Gewässergüte- und Bilddaten im Sinne von *River View*® setzt die Kalibrierung von Kamerasystem, GNSS und IMU als Mapping-System voraus. Die Projektanforderungen an die Verortungsgenauigkeit der erfassten Daten betragen in Lage und Höhe wenige Dezimeter (0,2 bis 0,5 m) und sind daher eher gering. Für die Kalibrierung dieses Multisensorsystems wurden daher vereinfachte Kalibrierungsverfahren entwickelt (Effkemann et al. 2017), die die photogrammetrischen Besonderheiten der omnidirektionalen Kamera berücksichtigen und die Bestimmung der Relativposen zwischen den Sensorkoordinatensystemen auf einem Bewegungsmodell mit ausschließlich kinematischen Größen gründen, also ohne Einbeziehung eines erdfesten Koordinatensystems. Unter diesen Voraussetzungen wurden als Standardabweichungen 0,5 bis 0,7 gon für das Misalignement (Rotationswinkel) und 1 bis 2 mm für den Leverarm (Translation bzw. Offset) erzielt.

2.2.2 Datenerfassung im und unter Wasser

Die chemisch-physikalischen Gewässerparameter werden mit einer Multiparametersonde (MPS) erfasst (Abb. 5). Eingesetzt wird das Modell *MPS-D8* der Firma SEBA Hydrometrie GmbH & Co. KG (SEBA 2018), das zwischen den beiden Schwimmkörpern des Katamarans montiert wird. Die MPS-Sonde registriert Messwerte zu Temperatur, Sauerstoffgehalt, pH-Wert, Leitfähigkeit, Redoxpotenzial und Trübung als Wassergüteparameter. In Verbindung mit der Trailer-Winde kann die Sonde auch in vordefinierten Tiefen zum Einsatz gebracht werden (vgl. Kap. 2.1).

Das RiverBoat verfügt über ein Single-Beam Echolot und ein Sidescan-Sonar, womit prinzipiell die



Abb. 5:
Multiparameter-
sonde MPS-D8

Quelle: SEBA GmbH

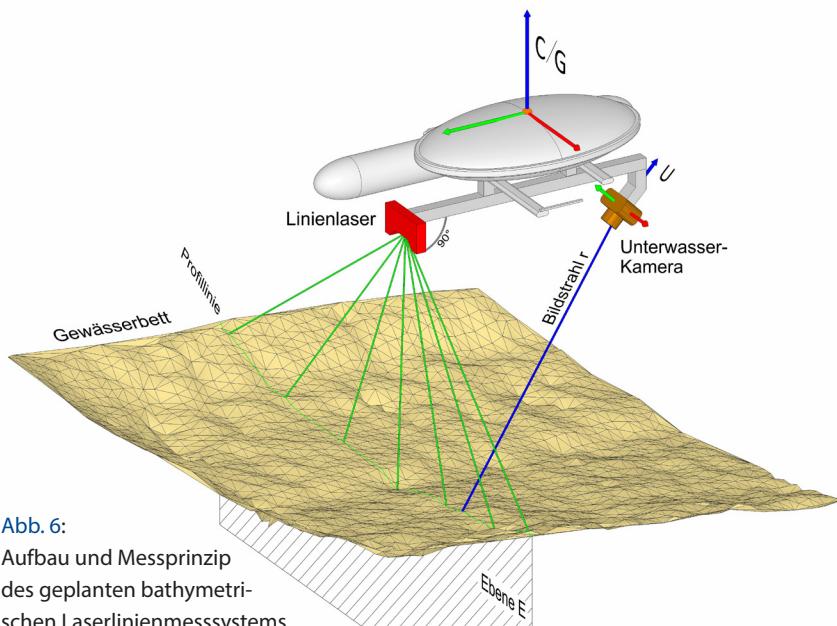


Abb. 6:
Aufbau und Messprinzip
des geplanten bathymetrischen
Laserlinienmesssystems

topographische Situation unter Wasser erfasst werden kann. Das Echolot für die bathymetrische Erfassung des Gewässergrundes ist allerdings auf eine Mindestwassertiefe von etwa 35 cm angewiesen. Sofern der Gewässerboden flächenhaft erfasst werden soll, erfordert dies wegen der Einzelstrahltechnologie eine systematische Befahrung des Gewässers, damit eine regelmäßige Anordnung von Profillinien gegeben ist. Diese Einschränkungen führen zu der Überlegung, das RiverBoat zusätzlich mit einem bathymetrischen Laserlinienmesssystem auszustatten. Das Messprinzip zeigt Abb. 6: Mit einer grünen Laserlichtquelle wird quer zur Fahrtrichtung ein Lichtfänger senkrecht nach unten projiziert. Auf der Gewässersohle entsteht eine grüne Linie, die den größten Teil des Gewässerbettes abdeckt und von einer unterwassertauglichen Kamera aufgenommen wird. Die Laserlinie am Gewässerboden wird durch Anwendung des photogrammetrischen Triangulationsprinzips dreidimensional vermessen, indem in den Digitalaufnahmen die Linien anhand von Bildverarbeitungsfunktionen (z. B. OpenCV 2018) detektiert und die Bildstrahlen mit der Ebene des Laserlichtfächers verschneitten werden. Die Verknüpfung dieser 3D-Profile führt schließlich zu einem dichten Netz und damit zu einer flächenhaften Kartierung der Gewässerbettes. Als Voraussetzung für die geometrisch korrekte Bestimmung der bathymetrischen Tiefendaten muss die Laserlinien-Kamera-Einheit kalibriert werden, was in diesem Fall anhand von photogrammetrischen Testfeldern mit dreidimensionalen Passpunkten geschehen soll (Luhmann et al. 2010). Das Laserlinienmess-

system, das bisher nur als einfacher Prototyp für qualitative Funktionsexperimente konzipiert ist, soll in Zukunft noch weiterentwickelt werden, da sich das Messverfahren gerade in Flachwasserbereichen als vielversprechend für die Anwendungen von *RiverView*® herausgestellt hat. Bei den ersten Tests in regionalen Gewässern (z. B. Wurm und Rur/Eifel) zeigte sich, dass durch Trübung, direkte Sonneneinstrahlung und Bewuchs die Einsatzmöglichkeiten des Messsystems limitiert werden. Als maximale Messtiefe konnte vorerst 0,5 bis 1 m realisiert werden.

3 Datenhaltung und -aufbereitung

Für *RiverView*® wurde ein projektspezifisches spatio-temporales Datenbankmanagementsystem implementiert, das die Grundlage für die effiziente Verwaltung, Speicherung und Nutzung sämtlicher Daten, die im Rahmen der Messfahrten erhoben werden, bildet. Neben den Positionierungs- und Orientierungsdaten des Überwasser-Mapping-Systems (GNSS und IMU) sind dies die chemisch-physikalischen Gewässergütedaten der Multiparametersonde, die Daten zur Gewässertopographie von Echolot und ggf. Laserlinienmesssystem, die großvolumigen Bilddaten der Panoramakamera sowie schließlich die Metadaten über die organisatorischen Aspekte der Messkampagnen. Die räumliche und zeitliche Referenzierung der genannten Daten basiert auf den Positionsdaten der Mapping-Plattform in Verbindung mit dem GNSS-Zeitstempel. Wenn wie bei der Multiparametersonde Informationen mit relativ geringen Messraten vorliegen, werden diese vor der Datenbank-Persistierung durch lineare Interpolation den gewünschten Zeitpunkten zugeordnet. Im umgekehrten Fall, etwa bei den mit 400 Hz hochfrequenten Aufzeichnungen der IMU, findet eine Ausdünnung der Daten durch Mittelung oder Filterung statt.

Zu *RiverView*® wurde ein bimodales Datenbankmodell entworfen und implementiert, um den weitgespreizten Anforderungen an eine effektive Datenspeicherung von sowohl großvolumigen Rasterdaten (Bilddaten) als auch den übrigen alpha-numerischen Sensordaten gerecht zu werden (Hein und Blankenbach 2017). Das Datenbanksystem setzt sich zum einen aus der Rasterdatenbank *Rasdaman* (Rasdaman 2018) für die Bilddaten und zum anderen aus der objekt-relationalen Open-Source-Datenbank *PostgreSQL* und der Erweiterung *PostGIS* (PostgreSQL/PostGIS 2018) für die übrigen Daten zusammen. Das Datenbankmodell benutzt die Trajektorienpunkte der Messfahrten, genauer die Posen (Positionen und Orientierungen) des Überwasser-Sensorsystems, als übergeordnete Entität für die primäre Referenzierung sämtlicher Daten nach Raum und Zeit (sog. *Tracks*). Die Daten von der Panoramakamera, Echolot, MPS usw. stellen separate Entitäten dar, die mit den Tracks verknüpft werden.

3.1 Datenaufbereitung

Vor der endgültigen Überführung der Daten in die Datenbank erfolgen Plausibilitätstests, etwa um Ausreißer und Lücken aufzudecken. Hinzu kommen wichtige Schritte zur Datenbereinigung. Beispielsweise werden die Referenzierungsdaten (Lage- und Höheninformationen), deren Qualität von der Anzahl der sichtbaren Satelliten und den Korrekturdaten für die RTK-Positionierung abhängt, speziellen Prüfalgorithmen unterzogen und bereinigt. Nur aus den qualitativ hochwertigsten Daten wird auf diese Weise die optimale Wasserspiegellage ermittelt und für weitere Referenzierungen etwa der Gewässertiefendaten verwendet.

3.1.1 Bilddaten

Die Bilddaten werden bei *RiverView®* durch das omnidirektionale Mehrkamera-System erfasst (s. o.). Durch die zeitsynchrone Auslösung der Einzelkameras liegen somit entlang der Trajektorie originär jeweils Sätze zu je sechs Einzelbildern vor. Diese dokumentieren die Gewässerumgebung in einer 360° Rundumsicht und werden in der Nachverarbeitung zu Panoramabildern zusammengefügt. Hierbei wurde die vom Kamerahersteller zur Verfügung gestellte Software anhand des Kamera-API (*Application Programming Interface*) um eine Lösung erweitert, die die Ergebnisse der eigenen Sensorkalibrierung berücksichtigt.

Darüber hinaus wurden auf der Grundlage des digitalen Auswertesystems PHIDIAS (Schwermann und Effkemann 2002) spezielle Messmodule entwickelt, mit denen eine unmittelbare photogrammetrische 3D-Objektvermessung in den Panoramen möglich ist. Mit diesen Messfunktionen kann ein Operateur beispielsweise auf einfache Weise die Uferlinie oder die Höhe der Uferoberkante unmittelbar in den Panoramabildern ermitteln (Abb. 7).

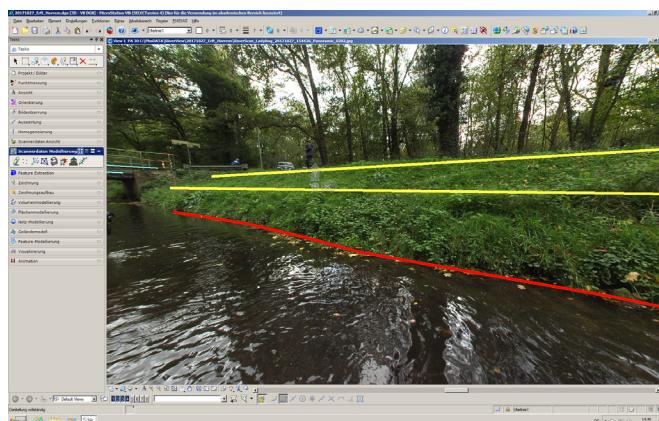


Abb. 7:
Interaktive
Messung von
Uferlinie und
Böschungskante
mit PHIDIAS

Neben der klassischen, photogrammetrischen Bildauswertung können mit Hilfe von Structure-from-Motion (SfM) Verfahren bzw. automatisierten Bildzuordnungsverfahren (*Image Matching*) aus den Aufnahmen bildbasierte 3D-Punktwolken generiert werden (Luhmann 2018). Wesentliche Voraussetzung hierfür ist ein hoher Überdeckungsgrad der Bildaufnahmen, was bei den Messfahrten von *RiverView*® regelmäßig gegeben ist. Bei der Bildzuordnung werden jeweils korrespondierende (homologe) Punkte in zwei oder mehr Bildern bestimmt, um anschließend durch Anwendung des photogrammetrischen Triangulationsprinzips zu den 3D-Koordinaten zu gelangen. Die Punktwolken

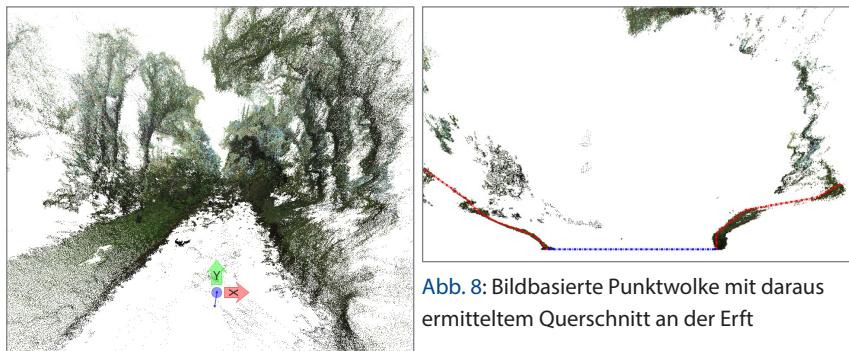


Abb. 8: Bildbasierte Punktwolke mit daraus ermitteltem Querschnitt an der Erft

stellen als Sekundärprodukt der Bilddaten eine gute Ergänzung der Gewässerdokumentation dar, denn sie liefern Informationen in der dritten Dimension. Die Ermittlung von Gewässerquerschnitten etwa für Erhebungen zur Gewässerstrukturgüte ist somit auch nachträglich ohne explizite Vorortvermessung möglich; das o. g. Auswertesystem PHIDIAS stellt diese Funktionalität beispielsweise zur Verfügung, denn Auswertungen können in Bildern und Punktwolken kombiniert durchgeführt werden. Abb. 8 zeigt ein Beispiel von einem Uferabschnitt an der Erft. Zu beachten ist bei Gewässerszenen, dass in den Punktwolken strikt zwischen den eigentlichen Uferböschungen und der Wasseroberfläche unterschieden werden muss. Die Punkte im Wasserbereich unterliegen meistens Fehlzuordnungen aufgrund der Spiegelungen.

Das SfM-Verfahren kann auch auf Aufnahmen unter Wasser und damit zur Erfassung der Gewässersohlentopographie angewendet werden; vorausgesetzt die Trübung lässt dies zu und der Gewässerboden besitzt genügend Texturierung. Abb. 9 zeigt ein Beispiel. Hierbei wurden jeweils bildbasierte Punktwolken aus Bildern sowohl von der Über- als auch der Unterwasserkamera generiert und zusammen mit Echolotmessungen kombiniert, um sie zu einem umfassenden DGM-W zu verschmelzen. Die Unterwasser-Punktwolken resultieren von den Bildern der Kamera des o. g. Laserlinienmesssystems (vgl.

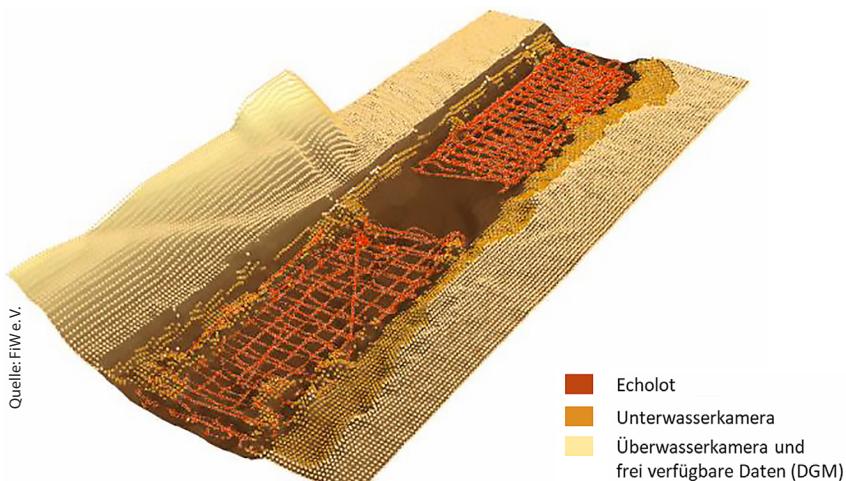


Abb. 9:

Vollständiges DGM-W eines Gewässerabschnittes über und unter Wasser, zusammengesetzt aus Punktwolken und Echolotdaten

Kap. 2.2.2). Die Überwasserdaten wurden mit DGM-Daten der Landesvermessung zwecks Lückenschluss ergänzt. Für die mittels SfM bestimmten Über- und Unterwasser-Punktdaten ergaben sich unter günstigen Voraussetzungen (gute Textur, klare Sichtverhältnisse, große Uferflächen) innere Genauigkeiten (RMS) von 0,9 bzw. 4,0 Pixel; übertragen in den Objektraum entspricht dies einer Genauigkeit der einzelnen DGM-Punkte von 1 bis 2 cm. Dieser Wert gilt in diesem Beispiel wegen der unterschiedlichen Bildmaßstäbe für beide Punktgruppen. Im Allgemeinen muss man jedoch davon ausgehen, dass die bildbasierten DGM-Daten nicht immer so homogen sind.

3.1.2 Positionierungsdaten

Die im vorherigen Kapitel angesprochenen Punktwolken stellten sich im Laufe des Projektes als eine nützliche Option für die Verbesserung der USV-Positionierung heraus. Wie die Testfahrten zeigten, können die Posen des Bootes in den Befahrungen nicht durchgängig mit Standardgenauigkeiten von ca. 2 cm bzw. 4 cm in Lage bzw. Höhe sowie besser als 1° in der räumlichen Orientierung bestimmt werden. Zum einen verschlechtern beispielsweise Abschattungen durch Vegetation die Empfangsbedingungen für die RTK-Korrektursignale. Zum anderen konnte die – relativ kostengünstige – MEMS-basierte IMU die Signalausfälle der GNSS/IMU-Einheit aufgrund der starken Drifteffekte in den Beschleunigungsmessungen nicht über einen Zeitraum von mehr als 20 Sekunden

überbrücken. Dieses Problem konnte alternativ durch Anwendung von Prinzipien der Visuellen Odometrie (VO) gelöst werden. Bei der Visuellen Odometrie bestimmt man die Eigenbewegung eines Trägerfahrzeugs anhand der Bilddaten, die von einer mitgeführten Kamera aufgezeichnet werden (z.B. Nister et al. 2004). Die visuell-odometrische Auswertung der Aufnahmen liefert als Ergebnis nicht nur die (zumeist dünnen) Punktwolken, sondern – gewissermaßen als Nebenprodukt – auch die Orientierungsdaten der Aufnahmen und somit mittelbar die Posen (d.h. Positionen und Orientierungen) des USV (Szeliski 2011), das bei *RiverView*® die Panoramakamera wie beschrieben in fester Anordnung mitführt.

Abb. 10 zeigt die (blaue) Trajektorie des USV an einem mit dem RiverBoat befahrenen Gewässerabschnitt an der Rur. Die Trajektorie wurde ausschließlich mit Visueller Odometrie bestimmt und den zentimetergenauen Positionsdaten

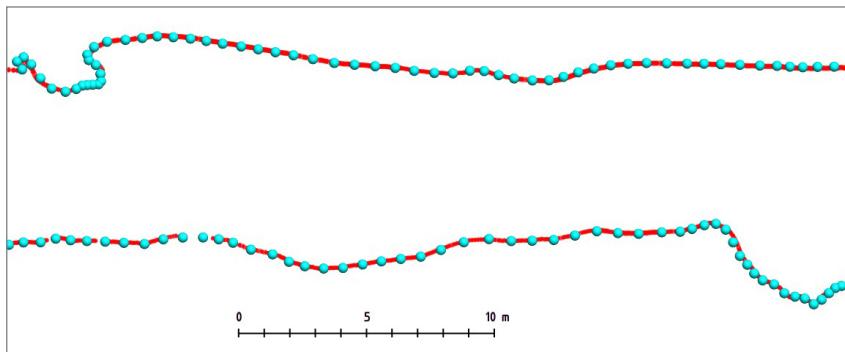


Abb. 10: Bestimmung der USV-Position durch Visuelle Odometrie (blau) und Vergleich mit RTK-GNSS-Messungen (rot); das linke und rechte Ufer wurden getrennt befahren.

einer ungestörten, RTK-korrigierten GNSS-Aufzeichnung (rot) gegenübergestellt. Die Abweichungen betragen in Lage und Höhe im Durchschnitt 2 bis 4 cm und zeigen damit das hohe Genauigkeitspotenzial der Visuellen Odometrie auf. Die Berechnung der Punktwolken und Orientierungsdaten wurden in diesem Beispiel mit einer kommerziellen Softwarelösung durchgeführt (Agisoft 2018). Weitere Entwicklungen von *RiverView*® zielen darauf ab, die SfM-Verfahren, die für die geschilderten visuell-odometrischen Anwendungen benötigt werden, durch Nutzung von *openCV*-Bibliotheken (OpenCV 2018) als eigenständige Lösung in das Softwaresystem von *RiverView*® zu integrieren. Hierdurch kann der Nutzer des Webportals (siehe Kap. 4) beispielsweise während einer Datenrecherche anlassbezogen für ausgesuchte Uferabschnitte bildbasierte Punktwolken generieren und sich auf diese Weise dreidimensionale Informationen verfügbar machen.

4 Datenbereitstellung und -präsentation

Wie in [Kap. 3](#) erläutert werden die im Rahmen von RiverView-Befahrungen erhobenen Daten in einem spatio-temporalen Geodatenbanksystem gespeichert und verwaltet. Der Abruf dieser Daten erfolgt über ein Webportal, das speziell



Abb. 11: RiverView-Panoramaviewer mit Anzeige der nächsten Panoramastation (in Gestalt einer Markersphäre) und lokalen Gewässerdaten

für die Projektbedürfnisse konzeptioniert und implementiert wird. Den räumlichen Orientierungsrahmen bei der Datenrecherche durch den interessierten Nutzer bilden neben den Metainformationen schwerpunktmäßig die Bilddaten, genauer die 360°-Bildpanoramen. Für eine unkomplizierte Handhabung wurde dazu ein eigener RiverView-Panoramaviewer entwickelt, der softwaretechnisch auf JavaScript (*Three.js*) basiert und browserbasiert ähnlich wie bei etablierten Onlinediensten (z. B. Google Street View) bedient wird ([Abb. 11](#)).

Der Einstieg in den RiverView-Datenbestand erfolgt im Regelfall über eine gewöhnliche Kartendarstellung, die die Standorte der Bildpanoramen in Form von Positionsmarkern übersichtlich präsentiert. Beim Anklicken eines Markers werden die korrespondierenden Bild- und Gewässerdaten aus der RiverView-Datenbank mit Hilfe eines Webdienstes abgerufen und dem Anwender steht ein 360°-Rundumblick für die Betrachtung der Uferumgebung zur Verfügung. Ein Wechsel zu den jeweils benachbarten Panoramen gelingt über weitere Positionsmarker, die positionsrichtig in die 3D-Szene eingebendet und per Mausklick angewählt werden. Die am jeweiligen Ort in *RiverView®* erfassten Gewässerdaten wie z. B. Wassertemperatur, pH-Wert, Trübung usw. lassen sich als

Kontextinformationen einblenden. Mit spezifischen Software-Werkzeugen sollen in Zukunft die – zumeist wenig anschaulichen – alpha-numerischen Daten textlich und visuell in eine leicht interpretierbare Form umgewandelt werden können, etwa in Form von Ganglinien oder Tabellen.

4.1 Nutzung von Virtual-Reality

Mit Virtual Reality (VR) können räumliche Sachverhalte – wie sie durch die Datenerhebung mit *RiverView*® gegeben sind – besonders anschaulich visualisiert werden. Neben dem rein optischen Aspekt besitzen VR-Anwendungen – im Vergleich etwa zu einfachen Fotografien – einen deutlichen Mehrwert; zum Beispiel, wenn sie als dreidimensionale Diskussions- und Entscheidungshilfe bei wasserwirtschaftlichen Planungen eingebunden werden. Der Nutzer einer VR-Szene kann in die computergenerierten 3D-Umgebungen eintauchen und auch damit aktiv interagieren. Mit Hilfe von Head Mounted Displays (HMD, sog. VR-Brillen) wird der Immersionseffekt spürbar verstärkt. Beispiele für populäre VR-Brillen sind *Oculus Rift* (Oculus 2018) und *HTC Vive* (HTC 2018). Damit die in *RiverView*® erfassten Gebiete virtuell befahren und optisch-visuell erkundet werden können, wurde eine entsprechende VR-Anwendung entwickelt.

Diese VR-Anwendung basiert auf der Game-Engine *Unity 3D* (Unity3d 2018), die für die Verarbeitung der Punktwolken und Panoramabilder speziell angepasst wurde. Die methodische Aufbereitung der in *RiverView*® erfassten Aufnahmen zu Panoramen und Punktwolken wurde schon in [Kap. 3.1.1](#) beschrieben. Der in der *Unity 3D* Engine systemseitig vorhandene 3D-Viewer wurde im Hinblick auf die Darstellung dieser Daten angepasst. Hierzu zählt u. a. die Schnittstelle für den Import der Punktwolken, die beim Einladen parallel die räumliche Transformation der Punkte in das Koordinatensystem der virtuellen Szene durchführt. Jeder Punkt stellt ein virtuelles Objekt dar, dessen RGB-Farbwert aus den originären Kamerabildern ermittelt wird. Darüber hinaus kann in Echtzeit auf dem Höhenniveau der Uferlinie eine gerenderte Wasserfläche platziert werden, die als Bewegungsfläche für das – ebenfalls virtuelle – RiverBoat dient. Die Bewegungen des RiverBoats erfolgen intuitiv anhand von Maus- und Tastaturaktionen. Durch die Generierung tageszeitabhängiger Schattenwürfe erfährt die Beleuchtung der Szene einen realitätsnahen Charakter. Um den Immersionseffekt zu verstärken, wird die Kulisse während der Betrachtung durch atmosphärische Geräusche ergänzt. Mit einem Fadenkreuzcursor, der sich ständig im Sichtfeld befindet, kann mit den Objekten interagiert werden. Auf diese Art erfolgt auch der Wechsel in andere Panorama- bzw. die Unteransichten, indem man die Positionsmarker mit den interaktiven Pfeilen lokalisiert. [Abb. 12](#) zeigt das Beispiel einer VR-Szene an der Lippe.



Abb. 12: Gerenderte VR-Szene an der Lippe mit Punktfolke, Panoramaspäre und Positionsmarker

5 Schluss und Ausblick

Das BMBF-Projekt *RiverView*® schafft die Grundlagen für eine nachhaltige Bewirtschaftung von kleinen und mittleren Fließgewässern durch einen ganzheitlichen Ansatz. Der Ausbau und die Renaturierung von Gewässern können auf neuartige Weise messtechnisch begleitet werden, indem gewässerbezogene Information mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung bereitgestellt werden. Mit dem RiverBoat können auch beengte Gewässerabschnitte sowohl ferngesteuert als auch autonom befahren werden. Besonderes Kennzeichen der mobilen *RiverView*-Sensorik ist die Möglichkeit, simultan 360°-Panoramabildaufnahmen, chemisch-physikalische Gewässergütedaten und dreidimensionale Informationen zur Über- und Unterwassertopographie zu erfassen und zu georeferenzieren. Die Verortungsgenauigkeit der Bild- und Gewässerdaten beträgt in ungestörten Bereichen 2 bis 4 cm und ist damit für die Projektanforderungen mehr als ausreichend. Die Daten werden in einem bimodalen Datenbanksystem gespeichert und über ein Webportal den Anwendern zur Verfügung gestellt.

Hinsichtlich der Erfassungssensorik konzentrieren sich die Weiterentwicklungen auf die Integration von stochastischen Filtern (u.a. Kalman) für die Fusion von GNSS, IMU und Bilddaten, um die Verfügbarkeit von Positionslösungen auch in gestörten Gewässerabschnitten (z. B. unter Brücken) mit ausreichender Genauigkeit zu gewährleisten. Außerdem soll das prototypisch untersuchte Laserlinienmesssystem in Verbindung mit einer Unterwasserkamera

hardware- und softwaremäßig weiterentwickelt werden, um das Gewässerbett auch in Flachwasserbereichen unabhängig von Echolotmessungen topographisch kartieren zu können. Damit gezielte Untersuchungen von Wasser und Sediment im Hinblick auf besondere Schadstoffe realisierbar sind, ist die Bestückung des Trägerbootes mit einem entsprechenden Probennehmer geplant. In diesem Zusammenhang gehen die Überlegungen auch in Richtung Ausstattung des RiverView-USV mit biologischen Sonden, die Daten über die organische Belastungssituation aufgrund von Landwirtschaft und Industrie erheben können. Mittelfristig bieten die bildbasierten Punktwolken die Chance, die Parameter zur Gewässerstrukturgütekartierung zumindest teilweise aus den Geometrieinformationen, die diesen 3D-Daten innewohnen, abzuleiten.

Literatur

- Agisoft (2018): www.agisoft.com, letzter Zugriff 04/2018.
- Bronstert, A.; Agarwal, A.; Boessenkool, B.; Fischer, M.; Heistermann, M.; Köhnreich, L.; Moran, T.; Wendi, D. (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses“. Teil 1: Meteorologische und hydrologische Analyse. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 61.
- Effkemann, C.; Schwermann, R.; Blankenbach J. (2017): Kalibrierung und Navigation eines Überwasser-Mapping-Systems für die Erfassung von bildhaften und sensorischen Gewässerparametern. In: Lienhart, W. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 17. Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, 2017. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Engels, R.; Schüttrumpf, H.; Blankenbach J.; Schwermann R. (2016): Die Digitalisierung der Wasserwirtschaft durch hochauflöste, raumzeitliche Informationsmodellierung. Gewässerschutz – Wasser – Abwasser, 2016, Essen.
- Hein, N.; Blankenbach, J. (2017): Vergleich von PostGIS und Rasdaman als Geodatenbank für großvolumige Bilddatenbestände eines mobilen Mappingsystems. AGIT Journal für Angewandte Geoinformatik, Ausgabe 03-2017, Wichmann-Verlag.
- HTC (2018): www.vive.com/de, letzter Zugriff 04/2018.
- Kutschera, G.; Blankenbach, J.; Bolle, F.; Jagow, M.; Sivicki, T.; Wirtz, J. (2018): RiverView – innovatives Gewässermonitoring mit unbemannten mobilen Messtechniken. 51. Essener Tagung für Wasserwirtschaft, 14.–16.03.2018, Essen.
- LANUV (2012): LANUV-Arbeitsblatt 18 – Gewässerstruktur in Nordrhein-Westfalen. Kartieranleitung für die kleinen bis großen Fließgewässer. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Recklinghausen.
- LSTS (2018): Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (Portugal). <https://lsts.fe.up.pt/toolchain/neptus>, letzter Zugriff 04/2018.
- Luhmann, T. (2018): Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Wichmann Verlag, Berlin.
- Luhmann, T.; Robson, S.; Kyle, S.; Boehm, J. (2014): Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. 2nd Edition. De Gruyter, Berlin/Boston.

- Nister, D.; Naroditsky, O.; Bergen J. (2004): Visual Odometry. Proceedings Int. Conference Computer Vision and Pattern Recognition, Washington DC.
- Oculus (2018): www.oculus.com/rift, letzter Zugriff 04/2018.
- OpenCV (2018): <https://opencv.org>, letzter Zugriff 04/2018.
- PostGIS (2018): <https://postgis.net>, letzter Zugriff 04/2018.
- PostgreSQL (2018): www.postgresql.org, letzter Zugriff 04/2018.
- Rasdaman (2018): <http://rasdaman.org>, letzter Zugriff 04/2018.
- Schwertmann, R.; Effkemann, C. (2002): Kombiniertes Monoplotting in Laserscanner- und Bilddaten mit PHIDIAS. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie und Laserscanning – Anwendung für As-Built-Dokumentation und Facility Management. Wichmann-Verlag, Heidelberg.
- SEBA (2018): www.seba-hydrometrie.com, letzter Zugriff 04/2018.
- Szeliski, R. (2011): Computer Vision – Algorithms and Applications. Springer Verlag, London.
- Unity3d (2018): <https://unity3d.com/de>, letzter Zugriff 04/2018.

Kontakt

Raimund Schwertmann | Christoph Effkemann | Nicole Hein | Jörg Blankenbach
Geodätisches Institut der RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohe Straße 1, 52074 Aachen
schwertmann@gia.rwth-aachen.de | effkemann@gia.rwth-aachen.de
hein@gia.rwth-aachen.de | blankenbach@gia.rwth-aachen.de

Gesa Kutschera

Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft (FiW) e.V. an der RWTH Aachen
Kackertstraße 15–17, 52056 Aachen
kutschera@fiw.rwth-aachen.de

Exploration von Fließgewässern in Kleineinzugsgebieten mit UAV- und USV-gestützten Multisensorsystemen

Hannes Sardemann

1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten treten in Europa vermehrt Starkregenereignisse auf, die sich durch eine große Niederschlagsmenge in kurzer Zeit in einem kleinen Gebiet auszeichnen (Müller und Pfister 2011). Dadurch kommt es vor allem in Flüssen mit kleinen Einzugsgebieten immer häufiger zu Sturzfluten (Bronsert et al. 2017). Diese Flüsse sind allerdings kaum mit Pegelstationen überwacht und die plötzlichen und kleinräumig auftretenden Sturzfluten können nicht mit herkömmlichen hydrologischen Modellen beschrieben und vorhergesagt werden (Borga et al. 2008).

Das interdisziplinäre Forschungsprojekt EXTRUSO beschäftigt sich daher mit der Entwicklung von Modellen und Prozessen für die Vorhersage von Extremereignissen in kleinen und mittleren Einzugsgebieten. Für eine hydrologische und hydrodynamische Modellierung der kleinräumigen Ereignisse werden hochaufgelöste Eingangsdaten benötigt. Dazu zählt neben einem dichten Netz aus hydro-meteorologischen Messstationen und kamerabasierten Pegeln (Eltnner et al. 2018) auch die Verwendung hochaufgelöster digitaler Geländemodelle des Flusses und der Ufer. Für die Aufnahme der Flussmorphologie wird ein unbemanntes Wasserfahrzeug (unmanned surface/water vehicle – USV/UWV) als Multisensorplattform eingesetzt. Die Ufer werden mit einem mobilen Laserscanner und einer 360°-Kamera erfasst, während die Bathymetrie mit einem Einzelpunkt-Echolot aufgenommen wird. Die angrenzenden Uferbereiche werden außerdem aus der Luft mit einem unbemannten Luftfahrtzeug (unmanned aerial vehicle – UAV) vermessen. Durch die Fusion der beiden Datenquellen entsteht eine hochaufgelöste 3D-Punktwolke des Flusses und des (Teil-)Einzugsgebiets. Neben der Verwendung für die hydrodynamische Modellierung und für die Berechnung von Überflutungsflächen, kann auch eine multitemporale Aufnahme für die Analyse von Veränderungen vor und nach einem Hochwasserereignis genutzt werden.

2 Das unbemannte Wasserfahrzeug

Als Plattform für die Aufnahme hochaufgelöster 3D-Punktwolken der Flussmorphologie wird das ferngesteuerte Messboot HyDrone von Seafloor Systems eingesetzt. Der Katamaran wurde vom Hersteller für bathymetrische Messfahrten konzipiert und im EXTRUSO Projekt zu einem Multisensorsystem erweitert (Abb. 1). Die Plattform hat eine Maximalgeschwindigkeit von 22 km/h, eine maximale Zuladung von 11,3 kg und je nach Geschwindigkeit eine Einsatzdauer

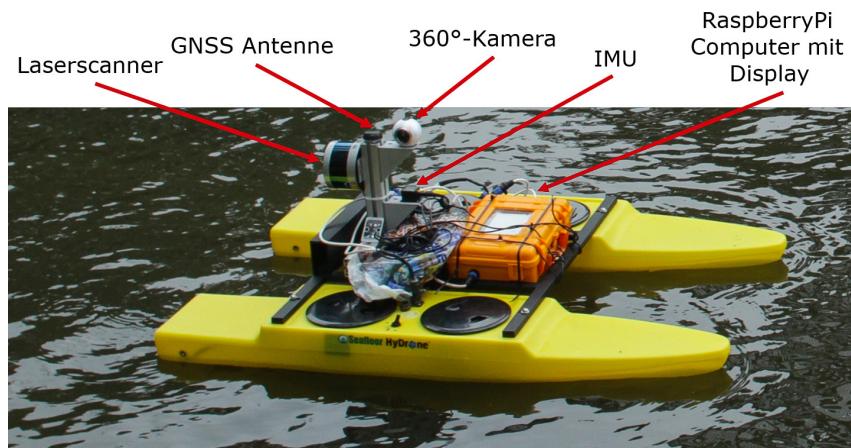


Abb. 1: Unbemanntes Wasserfahrzeug als Multisensorplattform mit Laserscanner, 360°-Kamera, Echolot, GNSS-gestützter IMU und RaspberryPi

von 5 bis 8 Stunden. Die Batterien werden in die wasserdichten Pontons eingesetzt und versorgen sowohl die Motoren als auch die Sensorik mit Energie. Zwei RaspberryPi Einplatinenrechner steuern die Sensoren an und speichern die Messdaten auf einer externen Festplatte. Die Datenauswertung wird im Post-Processing im Büro durchgeführt.

2.1 Konfiguration

Überwasser scannt ein Velodyne Puck Laserscanner die Ufer mit einer maximalen Punktrate von 0,3 Millionen Punkten pro Sekunde, einer Reichweite von 100 m und 3 cm 3D-Punktgenauigkeit ab. Eine Samsung Gear 360 nimmt ein Panoramavideo der Messfahrt auf. Die 360°-Kamera besteht aus zwei Fisheye-Objektiven, die mit jeweils 190° Öffnungswinkel in entgegengesetzte Richtungen ausgerichtet sind und ein vollsphärisches Panorama mit 7,3 Megapixel aufzeichnen. Die Bilder der 360°-Kamera können zum Einfärben der Laserscan-

ner-Punktwolke verwendet werden. Unterwasser misst das Einzelpunkt-Echolot ECT400 von EchoLogger die Wassertiefe mit einer maximalen Messrate von 10 Hz.

Für die Positionierung wird die GNSS-gestützte inertiale Messeinheit (IMU) Spatial von Advanced Navigation genutzt. Die IMU dient auch als zeitliche Referenz für das Gesamtsystem, da sie mit der GPS-Zeit synchronisiert ist. Sie überträgt jede Sekunde einen Puls und die aktuelle GPS-Zeit an den Laserscanner über eine RS232 Schnittstelle. Dieser ordnet jedem 3D-Punkt einen auf 0,05 ns genauen Zeitstempel zu. Die Messungen des Echolots werden ebenfalls per RS232 Schnittstelle an die IMU übertragen, dort mit einem Zeitstempel versehen und abgespeichert. Die 360°-Kamera kann nicht extern angesteuert und somit auch nicht mit der IMU synchronisiert werden. Daher wird die GPS-Zeit während der gesamten Messfahrt auf einem Display angezeigt, der auf dem USV angebracht ist und sich im Sichtbereich der 360°-Kamera befindet. So kann in jedem Bild die Zeit abgelesen werden (manuell oder per automatischer Texterkennung). Erste Tests haben allerdings gezeigt, dass die Zeit auf dem Display aufgrund von Sonnenreflexionen nicht immer erkannt wird. Um die Bilder der 360°-Kamera nutzen zu können, muss im weiteren Verlauf des Projekts die zeitliche Synchronisierung der Kamera optimiert werden.

2.2 Kalibrierung

Um die Bilder der 360°-Kamera für die Kolorierung der Laserscanner-Punktwolke nutzen zu können, muss die relative Orientierung zwischen den beiden Sensoren kalibriert werden. Dafür wird das von Mader et al. (2014) vorgestellte Verfahren adaptiert. Das Kalibrierfeld besteht aus sieben Kegeln, die mit kodierten Messmarken versehen sind. In einer photogrammetrischen Bündelblockausgleichung werden die 3D-Positionen der Messmarken in einem lokalen Koordinatensystem bestimmt. Im nächsten Schritt wird mit Structure-from-Motion (SfM) eine dichte Punktwolke generiert. Dabei gehen die Ergebnisse der Marken-basierten Ausgleichung mit in die Berechnung ein. Die SfM Punktwolke dient als Referenz für die Kalibrierung von Laserscanner und Kamera (Abb. 2a). Die äußere Orientierung (Translation und Rotation) der 360°-Kamera kann mit einem räumlichen Rückwärtsschnitt mit Fisheye-Kameramodell bestimmt werden (Abb. 2b). Die äußere Orientierung des Laserscanners wird über Kegelfits bestimmt, indem Kegel in die Referenzpunktewolke und die Punktwolke des Laserscanners eingepasst und gleichgesetzt werden (Abb. 2c-d).

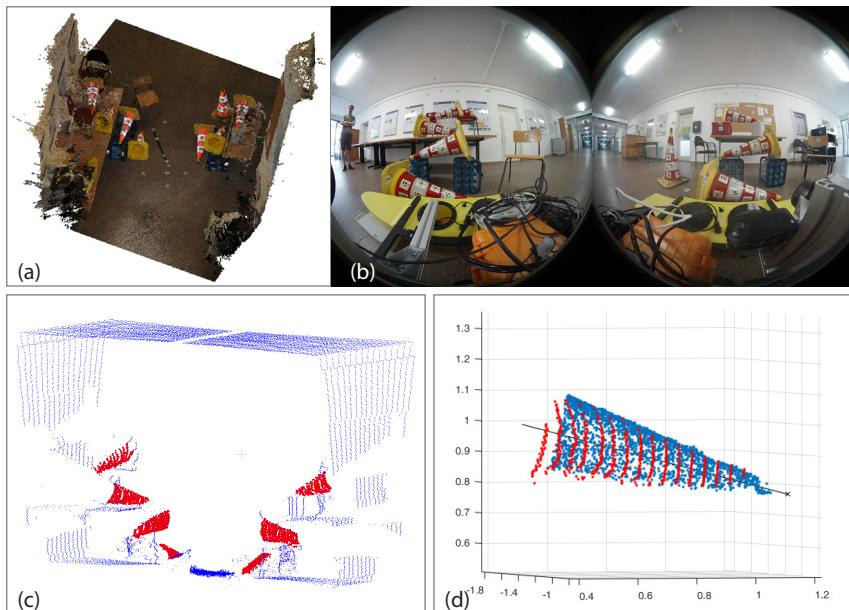


Abb. 2: Kalibrierung der relativen Orientierungen. In einem Kegel-basierten Kalibrierfeld (a) werden die äußeren Orientierungen der 360-Kamera (b) und des Laserscanners (c) mit räumlichem Rückwärtsschnitt und Kegelfit (d) bestimmt.

3 Ergebnisse einer Messfahrt

Auf einem ca. 1,5 km langen Abschnitt der Freiberger Mulde in Sachen zwischen Dresden und Chemnitz wurden Messfahrten mit dem USV durchgeführt. Die Scanstreifen des Laserscanners können anhand der mit der IMU gemessenen Position und Orientierung zu einer gemeinsamen Punktwolke der Ufer kombiniert werden. Abb. 3 zeigt einen Ausschnitt der Laserscanner-Punktwolke. Die Punkte sind Intensitätskodiert dargestellt. In zukünftigen Messungen sollen die Farbwerte aus den Bildern der 360°-Kamera für eine Kolorierung der Punktwolke genutzt werden.

Um aus den Einzelpunktmessungen des Echolots das gesamte Flussprofil abzuleiten, muss eine geeignete Befahrungsstrategie für eine anschließende Interpolation gewählt werden. Querprofile in kleinen Abständen eignen sich am besten, gefolgt von einer Zick-Zack-Befahrung (Krüger et al. 2018). Da sich bei Querprofilen das Ufer nicht mehr im Sichtfeld des Laserscanners befinden würde, wurde eine Zick-Zack-Befahrung gewählt. Als geostatistisches Interpolationsverfahren wird Kriging angewendet, welches nach den Untersuchungen

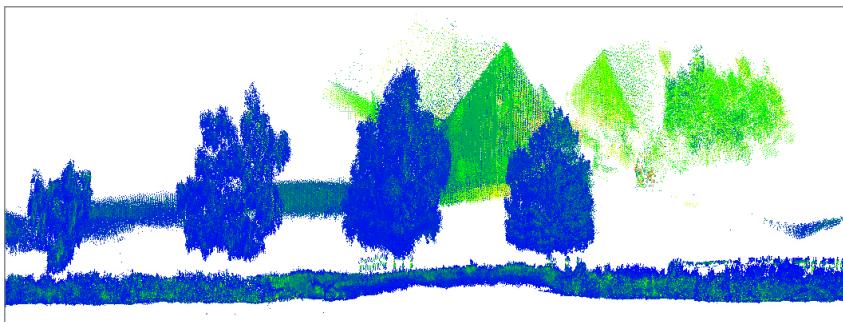


Abb. 3: Intensitätskodierter Ausschnitt der Laserscanner-Punktwolke

von Krüger et al. (2018) die besten Ergebnisse liefert. Die Echolotmessungen werden vor der Interpolation in ein flussorientiertes Koordinatensystem abgewickelt um Wechselwirkungen mit benachbarten Messungen im Kurvenbereich zu vermeiden.

Die angrenzenden Uferbereiche wurden in einer UAV-Befliegung mit einer Kamera aufgenommen. Aus den Bildern kann mit SfM eine Punktwolke der Uferbereiche berechnet werden. Da die Ufer mit Vegetation bewachsen sind, können sie nicht komplett von der Luft aus eingesehen werden. Besonders an diesen Stellen eignet sich die USV-basierte Punktwolke um die Lücken zu füllen. Abb. 4 zeigt die fusionierte Punktwolke der UAV- und USV-basierten Aufnahmen.

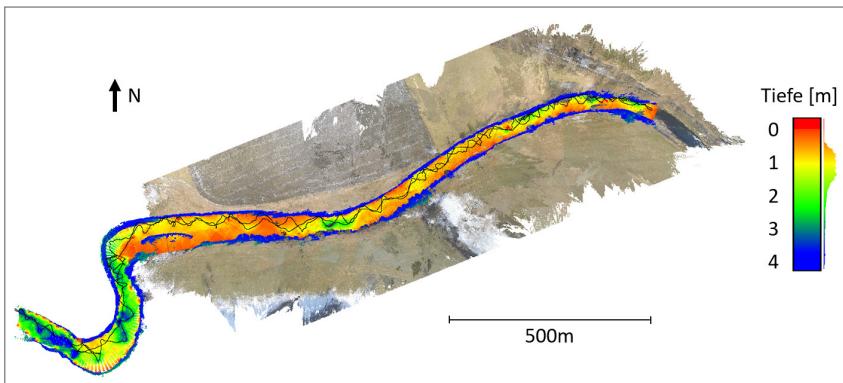


Abb. 4: Ergebnisse einer Messfahrt auf der Freiberger Mulde. Die Punktwolke des Laserscanners ist blau dargestellt. Die schwarze Linie zeigt die Route des USV in einer Zick-Zack-Befahrung auf Hin- und Rückweg. Die interpolierten Echolotmessungen sind tiefenkodiert dargestellt. Die angrenzenden Uferbereiche wurden mit SfM aus UAV-Aufnahmen generiert.

Dank

Diese Untersuchungen wurden im Forschungsprojekt “Extremereignisse in kleinen und mittleren Einzugsgebieten (EXTRUSO)“ durchgeführt, welches durch das EU ESF Programm „Nachwuchsforschergruppen“ unter der Fördernummer 100270097 unterstützt wird. Die UAV-Punktfolge wurde von der Professur für Geoinformatik der TU Dresden bereitgestellt und ist im Rahmen des Forschungsprojekts „Bootgestütztes Messsystem für longitudinale Gewässerprofile (BOOT-Monitoring)“ entstanden, welches Teil der BMBF-Fördermaßnahme „Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland (ReWaM)“ ist.

Literatur

- Borga, M.; Gaume, E.; Creutin, J.D.; Marchi, L. (2008): Surveying flash floods: gauging the ungauged extremes. *Hydrological processes* 22(18). 3883–3885.
- Bronstert, A.; Agarwal, A.; Boessenkool, B.; Fischer, M.; Heistermann, M.; Köhn-Reich, L.; Moran, T.; Wendi, D. (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses“. *Hydrologie und Wasserwirtschaft* 61. 150–162.
- Eltner, A.; Sardemann, H.; Kröhnert, M.; Maas, H.-G. (2018): Entwicklung eines Low-Cost Kamerapegels zur Erfassung hydrologischer Extremereignisse. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V.*, Band 27, 38. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF und PFGK, 07.–09. März 2018 in München. 573–583.
- Krüger, R.; Karrasch, P.; Bernard, L. (2018): Evaluating Spatial Data Acquisition and Interpolation Strategies for River Bathymetries. In: Mansourian, A., et al. (Hrsg.): *Geospatial Technologies for All*. Springer International Publishing. 3–24
- Mueller, E. N.; Pfister, A. (2011): Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe. *Journal of Hydrology* 411 (3). 266–278.

Kontakt

Hannes Sardemann

Technische Universität Dresden, Professur für Photogrammetrie

01063 Dresden

hannes.sardemann@tu-dresden.de

AUVs at WTD 71 in Research & Use and Emerging Technologies in Underwater Munitions Mapping

Wolfgang Jans | Daniel D. Sternlicht

1 Introduction

For centuries, oceans, lakes and rivers throughout the world have been the repository of expended and discarded munitions, through various activities such as military engagement, weapons testing and training, accidents, and by dumping. Different types of ammunition used in military operations during the two World Wars in Europe are encountered periodically in rivers, bays, and at sea (Fig. 1). As examples: in 2005, three fishermen lost their lives in the North Sea when a WWII bomb exploded on their vessel after it was hauled aboard in their fishing nets (OSPAR Commission 2009). In 2015, a family on a beach in Wales played on top of what appeared to be a fouled buoy, but

which turned out to be a U.S. WWII moored mine (Dailymail 2015). The size distribution of underwater expended or unexploded ordnance (UXO) is much broader than the given examples suggest, ranging from single rifle cartridges and artillery shells, to sea mines, 2000 lbs bombs, V1 missiles or missile heads, and torpedoes or torpedo heads.

In the North Sea and the Baltic Sea approximately 700,000 mines were laid during the two World Wars (Winkelmann 2014), many of

Voß et al. 2017



Fig. 1: Boxes with ammunition were dropped not far from the coast.

these unrecovered and regularly found to this day. Following these conflicts, millions of tons of munitions ranging from conventional to phosphorus incendiary devices to chemical munitions containing mustard gas and other substances, were dumped by many nations in an oceanic arc spanning from Spain to Norway. Underwater munitions disposal was stopped in 1972 when international agreements were reached to regulate the dumping of material at sea (OSPAR Commission 2009, Jans et al. 2012). In the U.S. many active and former military installations, some dating as far back as the 18th century, have artillery/bombing/training areas that include adjacent water environments and coastal ocean areas. Over the years, weapons testing, disposal and accidents have generated munitions contamination in the coastal and inland waters throughout the country. The U.S. Army Corps of Engineers has identified more than 400 underwater formerly used defense sites potentially contaminated with munitions, and the U.S. Navy Munitions Response Program manages more than 50 closed and active sites potentially contaminated with munitions (SERDP/ONR Workshop 2013).

Three acknowledged dangers caused by expended, lost or discarded munitions include: direct physical contact with either chemical or conventional munitions resulting in threats to human health; contamination of marine organisms and the environment with the potential for concentration of toxic contaminants up the food chain; and spontaneous explosions which can be directly life threatening and spread munitions material (Beddington et al. 2005). Direct physical contact or disturbance of munitions can occur through activities such as fishing, laying cables and pipelines, construction, dredging, and diving, with the former accounting for more than half of encounters. The highest density of encounters for European waters has been reported in the southern North Sea between the United Kingdom and the Netherlands (OSPARA Commission 2009).

Until about 2010, offshore UXO detection and removal operations were carried out on a small scale; however, since then, European and U.S. initiatives in mapping and remediating UXO contamination have grown significantly (Winkelmann 2014, Jans et al. 2012, Hunter et al. 2011, Clem et al. 2012, Angle et al. 2017, Hansen et al. 2017). This is due largely to population and economic activity growing adjacent to coastal areas, thus increasing utilization of the maritime environment for food (fisheries), energy production (offshore oil and gas, wind farms, tidal power), commerce (harbour construction and extension, seabed pipelines and telecommunication cables), and recreation.

Tools for terrestrial UXO detection have been developed and standardized over many years and rely primarily on passive magnetic systems that measure a ferrous object's disturbance of the earth's magnetic field and pulsed electromagnetic induction (EMI) systems that measure induced eddy currents in objects. UXO surveys in water bodies have until recently been primarily conducted by

using geophysical survey gear such as magnetometers, acoustic imaging systems that include side scan sonars (SSS) and multi-beam echosounders (MBE), and underwater cameras for object identification.

2 Challenges & Innovation

There are numerous challenges to UXO mapping, first and foremost being that the location of many areas associated with military engagement, testing or dumping were not well documented, if at all, thus requiring the need for precision sensors with wide area coverage rates. Conditions that can challenge sensors include the fact that unexploded ordnance has a broad size distribution with diverse composition; can be encrusted, fragmented and buried in the sediment; and can reside in complex underwater environments (Fig. 2).



Fig. 2: From North and Baltic Sea (left to right): grenade, burst, 2016 – rusted British cartridge case, 2015 – grenade, embedded in concrete, 2013

Bottom types can vary from mud to sand to rock, the water-sediment interface can vary from smooth to rough to rippled modulated by the impacts of fishing activity and bioturbation, and platform-challenging hydrodynamic conditions such as high currents and shallow beach heads are common.

Passive magnetic arrays towed from surface vessels or integrated onto underwater vehicles have been shown to detect larger UXO on top of or buried in the sediment, and when combined with accurate positioning, can provide seafloor magnetic contour maps – with some systems demonstrating the capability of providing accurate data inversions yielding target parameters, including location, size, and depth. The biggest issues are short stand-off distances (1–3 m from the seafloor for magnetics and closer for EMI), accurate navigation, and electromagnetic interference emanating from the platform. High-frequency commercial off-the-shelf (COTS) side scan, multi-beam and forward-looking sonars are capable of creating modest-range (tens of meters) high-resolution images of the seabed and UXO lying thereon. These systems offer higher area coverage rates than magnetic sensors; however, they are range-limited due to the sonar's radial beam pattern, and unable to detect buried objects in dense substrates due to short-wavelength acoustic attenuation. With the exception of certain tropical

and stillwater environments, COTS optical systems such as underwater cameras have shown limited utility in UXO mapping due to light attenuating turbidity, and to date have been used primarily for close-range target identification.

An emerging generation of high-end underwater sensors and platforms, many with continuously reducing price points, are beginning to impact UXO mapping applications. These underwater mapping systems can be airborne, shipborne, towfish mounted, or deployed on unmanned tethered or autonomous surface and undersea vehicles; and to date each of these platform types has been employed or proposed for undersea UXO mapping. Each platform type has its respective pros and cons depending on targets expected, the environment encountered, and the budget/manpower of the surveyor. For example, a shallow clear-water environment with only exposed (i. e. non-buried) munitions may lend itself to a high-speed airborne survey with an optical sensor. However, a coarse sandy environment with predominantly buried artefacts will likely require the use of short-standoff sensors mounted on an underwater platform. Some water depths will lend themselves to shipborne sensors, whereas knee-deep water depths, typical of a recreational beach exhibiting sand mobility, will likely require a small manned or unmanned surface craft or crawler employing magnetics. Over the coming years the choice of platform(s), along with sensors, for UXO mapping will require tradeoff studies on concepts of employment that account for the conditions described above, along with anticipated manning requirements and anticipated price reduction of select technologies.

Associated with the choice of platform will be the ability to precisely navigate and to localize sensed munitions. While sensors mounted on airborne and surface craft have the benefit of GPS positioning, underwater sensors operating in this RF-attenuating GPS-denied environment will require navigation aids such as: inertial navigation systems (INS) which may be aided by Doppler velocity log (DVL) sonars and Kalman filter state estimation algorithms, such as found on many lightweight autonomous undersea vehicles (AUV); Ultrashort Baseline (USBL) underwater acoustic positioning systems that aid in determining the position of a towfish relative to the survey craft in order to exploit shipborne GPS; or the use of markers or features on the bottom for positional referencing via sensor data.

2.1 Emerging Sensors for Underwater UXO Mapping

Despite inherent range restrictions, total-field magnetometers and gradiometers continue to show utility and technological advances in underwater applications; e. g., AUV-deployment of high-performance gradiometers using a laser for optical pumping of helium-4 or cesium gas to increase sensitivity (Clem et al. 2012), and towfish-mounted superconducting quantum interference device (SQUID)

based gradiometers (Angle et al. 2017). Since the total magnetic field of an object drops approximately with the third order in range, a detectable magnetic anomaly is roughly reduced by a factor of 8 when doubling the distance between an object and a magnetic detector. Thus the total magnetic anomaly for a 250 lbs bomb (~110 kg) will decrease from 800 nT at a distance of 1 m, to 100 nT at a distance of 2 m, to 12 nT at a distance of 4 m, etc. ... (Winkelmann 2014). This decay helps to illustrate the tradeoffs in platform type. Executing a dense survey grid with the required lane separation of several meters is a task well suited to an AUV; however, the magnetic influence of the propulsion motor and other vehicle components can present background noise that exceeds the detection floor of the sensor. Typically a towfish is magnetically quieter than an AUV for accommodating sensitive magnetic sensors (Kretschmer et al. 2016); however, active motion-control surfaces may be required to achieve the trajectory requirements of low altitude and tight lane spacing. The primary advantages of these sensors are that they detect exposed as well as buried objects, and that they are normally not significantly influenced by sediment properties of the seafloor. However, due to the measured small magnetic anomalies caused by single pieces of ammunition and a varying signal background caused by the seafloor, complications can arise in munitions detection (Kretschmer et al. 2016). It should be noted that even WWII ammunition exists that was manufactured with aluminum or other non-ferromagnetic materials which cannot be detected by these sensors. To identify these non-ferrous materials it is expected that EMI systems adapted to work in these environments will play a role.

The synthetic aperture sonar (SAS) is one of the newest, innovative developments in the field of acoustic seabed imaging. By coherent processing of data from a series of consecutive pings a significantly longer receive aperture is synthesized in the direction of travel. When synthetic aperture techniques are applied at sufficiently low acoustic frequencies, where sound absorption in the ocean medium is reduced, a modest-sized system can generate imagery with a constant lateral resolution comparable to that of higher frequency sonar systems, but with a longer range potential (Sternlicht et al. 2004). Hence, the lateral resolution is often improved by an order of magnitude or more for SAS systems compared to conventional SSS, with typical resolutions of 2 to 4 cm along and across track. This significantly higher resolution results in enhanced object classification capability at higher area coverage rates. SAS systems have seen increasing use for UXO mapping throughout the decade (SERDP/ONR Workshop 2013, Clem et al. 2012, Angle et al. 2017, Hansen et al. 2017, Kretschmer et al. 2016). **Fig. 3** gives as an example a SAS and a MBE image from a dumping site in German waters. Shown is a cluster of about 70 moored mines from WWII laying on the seabed. In the left SAS image the individual oval-round shapes of each mine is clearly visible due to the high resolution of 2 to 4 cm. This is not the case in the

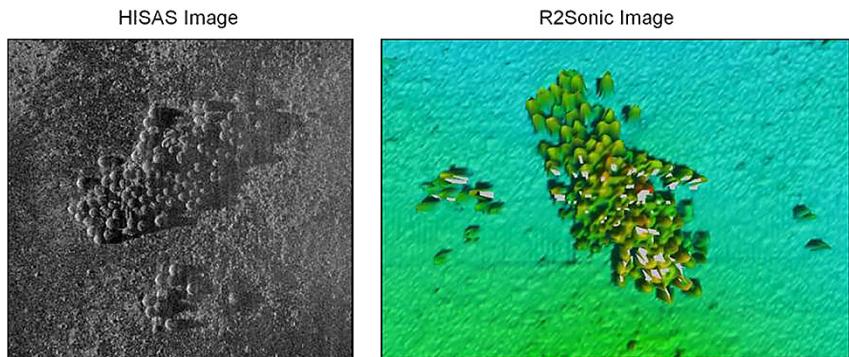


Fig. 3: SAS (left) and MBE (right) images of approximately 70 moored mines from a dumping site in German waters

right MBE image due to the lower resolution of about 25 cm, but the structure of the mine cluster can be clearly identified.

Recently, circular synthetic aperture sonar (CSAS) techniques for UXO identification have been developed (Clem et al. 2012, Angle et al. 2017, Sternlicht et al. 2012). CSAS involves circling the sonar about a detected object to create a fused, very high resolution image from all aspects. Although falling short of optical imagery, CSAS imaging far exceeds the quality obtained with conventional sonars. This imaging modality has been successfully used to confirm the identity of UXO-like objects as in [Fig. 4](#), and has been key to determining when and where to employ divers for remediation purposes.

Low-frequency SAS, as a complement to high-frequency SAS, offers the advantages of enhanced capabilities in sediment penetration and object classifi-

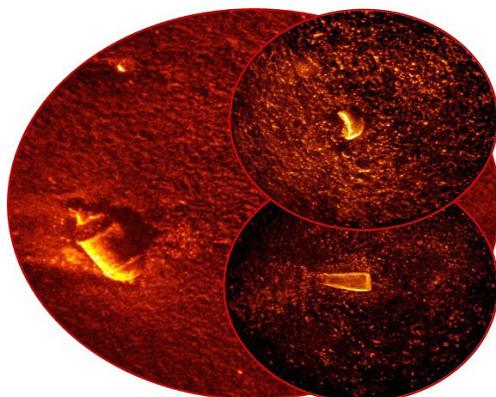


Fig. 4:
CSAS images created with the U.S. Office of Naval Research Small Synthetic Aperture Mine-hunter (SSAM) sonar, enabling identification of WWII-era mine remnants (left), fractured sphere (top right) and a wedge-shaped rock (bottom right).

cation. The differences in an object's acoustic response and the ability of sound waves to penetrate the sediment differ significantly between high-frequency systems ($>> 100$ kHz) and low-frequency systems ($<< 100$ kHz) (Groen et al. 2015). The use of low frequencies and the presence of a roughly textured seabed enable penetration into sandy substrates, so that such a system can detect objects in the top sediment layer – which would otherwise be opaque to higher frequency systems. An example is given in Fig. 5, where a flush-buried torpedo in Lübeck Bay found in 2016 appears significantly clearer in the SAS image recorded at 22 kHz (right) compared to the SAS image recorded at 75 kHz (left).

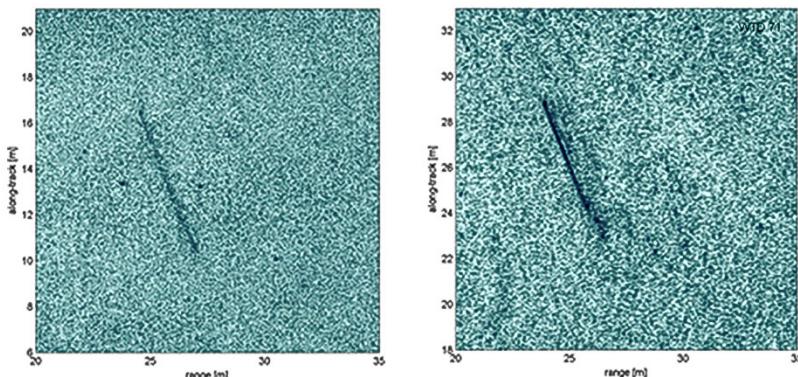


Fig. 5: SAS Image of flush-buried torpedo recorded with German SAS system at 22 kHz (right) and 75 kHz (left)

Low-frequency downward-looking SAS systems have been developed that create modest-range 3-D images of the sediment volume. One such example is the broadband Buried Object Scanning Sonar (BOSS) which traditionally has operated with acoustic wavelengths in the vicinity of 10 cm, and is capable of mapping voxels (or data points on a regularly spaced, three-dimensional grid) to similar dimensions. Over the last 15 years, work has been done in merging this system on an AUV with a magnetic gradiometer and optical sensor for classification of buried munitions (Sternlicht et al. 2006). An example is shown in Fig. 4, where the magnetic gradiometer provides a magnetic moment and localization (yellow dot on other images) illustrated by the 3-axis gradiometer time series, and the BOSS processing software creates top-, front-, and side-view maximum intensity projections of the sediment volume. The optical sensor does not reveal any surface expression because the object is fully buried. Thus, by combining shape from imagery with magnetic characteristics, high confidence classification of buried munitions is possible. Exploitation of frequency diversity

for this and a variety of other sonars (or combinations of systems) may also improve UXO classification via analysis of target strength as a function of acoustic wavelength and other spatial/temporal parameters (Hunter et al. 2011, Williams et al. 2010, Kargl et al. 2015, Lim 2015). This represents an active research area as discussed in Ref. (SERDP/ONR Workshop 2013). It is expected that these types of downward-looking low-frequency sonar systems combined with magnetic or EMI sensors will play a key role in the mapping of UXO that are buried, which may account for more than 70 % of munitions contamination (DiMarco et al. 2010).

Other active areas of research in UXO mapping sensors include automatic target recognition and multi-sensor fusion (Jans et al. 2012, Clem et al. 2012, Angle et al. 2017, Groen et al. 2015, Sternlicht et al. 2006, Isaacs 2015), active-source optics (Jans et al. 2012) and parametric sonar development (Jans et al. 2012, SERDP/ONR Workshop 2013, Angle et al. 2017).

3 AUVs at WTD 71 in Research & Use

In recent years the HUGIN AUV team of WTD 71 supported the German Waterways and Shipping Directorate in searching UXOs in Baltic Sea. The HISAS image in [Fig. 3](#) was generated with the HUGIN 100 AUV system of WTD 71 in Kiel Bay. This is just one example of objects found during those surveys. The gathered data are also used by WTD 71 to develop autonomous methods, of which adaptive line spacing is just an example. Adaptive line spacing is of importance, since the sonar range of modern SAS systems may depend strongly on environmental factors and may vary significantly over short travel distances, resulting in uncovered gaps during a survey.

A second AUV system, the SEA OTTER MKII AUV of WTD 71, has in recent years been used to develop low frequency SAS. An example is given in [Fig. 5](#), where a flush-buried torpedo in Lübeck Bay found in 2016. This sea experiment was part of the U.S. Department of Defense Coalition Warfare Program between the Naval Surface Warfare Center, Panama City Division from the United States and WTD 71 from Germany, in partnering to enhance joint capabilities in mapping underwater munitions in challenging and harsh environments – with an emphasis on utilizing unmanned underwater vehicles for detection and localization of buried objects (Angle et al. 2017).

Prior to that, WTD 71 was from 2012 to 2015 one of the project partners in the joint project “Berührungsreie Sondierung von Gewässeruntergründen zwecks Auffindung von Altmunition und anderen Gefahrstoffen zur Gewährleistung der gefahrenlosen Gründung von Offshore-Windenergieanlagen” (short SOAM) funded by the Federal Ministry of Economics (BMWi). Further partners

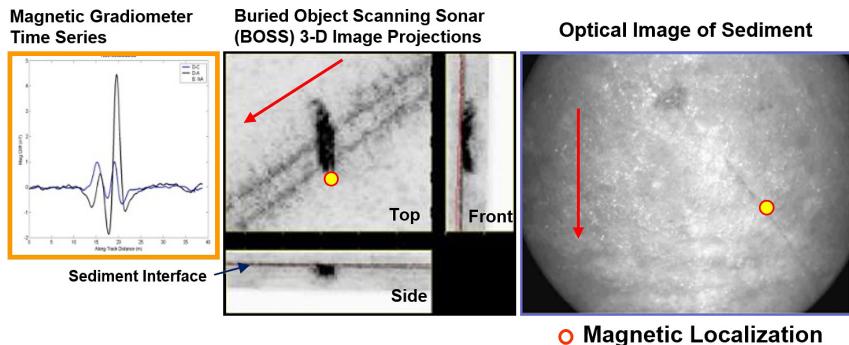


Fig. 6: Gradiometer time series, BOSS and optical imagery of buried cylinder

were the CUTEC Institute in Clausthal-Zellerfeld and the companies Heinrich Hirdes EOD Services GmbH, Hamburg and Atlas Elektronik GmbH, Bremen. During those studies a SeaHorse AUV of Atlas Elektronik equipped with a bottom penetrating BOSS Sonar and magnetometers was used for the detection of dumped ammunition. Results were similar to what is shown in Fig. 6. Also a smaller SeaCat AUV of WTD 71 equipped with a chemical sniffer for detecting dumped ammunition was used during those experiments (Kretschmer et al. 2016).

4 Discussions & Further Directions

This paper reviews the conventional underwater sensing technologies that have been used for the mapping of underwater unexploded ordnance, and describes emerging advances in underwater sensors, platforms, and automation predicted to increase the efficiency of munitions classification in many areas and make munitions detection and classification possible for the first time in buried, cluttered and other challenging environments. These include: high-frequency and low-frequency synthetic aperture sonar; advances in magnetometers, magnetic gradiometry, and electro-magnetic induction; advances in signal and information processing; and the development of autonomous undersea vehicles and sophisticated tow platforms. These advances are being evaluated and realized at an accelerated pace due to a number of international collaborations in munitions mapping and remediation.

References

- Angle, J.; Chwala, C.; Claussen, N.; Hilgenfeld, B.; Hölscher-Höbing, U.; Isaacs, J.; Prater, J.; Scholz, R.; Schmaljohann, H.; Vaizer, L. (2017): Results from the joint Baltic survey, performed as part of the Allied Munitions Detection Underwater Project between the United States and Germany. Proc. UACE, Skiathos, Greece, September 2017.
- Beddington, J.; Kinloch, A. J. (2005): Munitions dumped at sea: A literature review, Imperial College London.
- Clem, T. R.; Sternlicht, D. D.; Fernandez, J. E.; Prater, J. L.; Holtzapple, R.; Gibson, R. P.; Klose, J. P.; Marston, T. M. (2012): Demonstration of advanced Sensors for Underwater Unexploded Ordnance (UXO) Detection. Proc. MTS/IEEE OCEANS, Oct. 2012.
- Dailymail (2015): www.dailymail.co.uk/news/article-3201972/Children-pose-holiday-snaps-unexploded-World-War-Two-Wales.html from 18.08.2015.
- DiMarco, R.; Keiswetter, D.; Bell, T. (2010): Deep water munitions detection system. ESTCP Project Final Report, Distribution unlimited.
- Groen, J.; Schmaljohann, H.; Leier, S.; Jans, W. (2015): Synthetic aperture sonar fusion for images with dissimilar physical content due to differences in acoustic frequency. Proc. UACE.
- Hansen, R. E.; Lorentzen, O. J.; Synnes, S. A. V.; Sæbø, T. O. (2017): Mapping unexploded ordnance (UXO) using interferometric synthetic aperture sonar. Proc. UACE, Skiathos, Greece, September 2017.
- Hunter, A. J.; van Vossen, R.; Quesson, B. A. J.; Colin, M. E. G. D.; Zampolli, M.; Beckers, A. L. D. (2011): Low frequency synthetic aperture sonar for detecting and classifying buried objects. Proc. ECUA.
- Isaacs, J. C. (2015): Sonar automatic target recognition for underwater UXO. IEEE Computer Vision & Pattern Recognition Workshop.
- Jans, W.; Reuter, M.; Behringer, S.; Bohlmann S. (2012): Probing the seafloor in order to find dumped ammunition and other hazardous materials. Future Security, Vol. 318.
- Kargl, S. G.; Espana, A. L.; Williams, K. L.; Kennedy, J.; Lopes, J. L. (2015): Scattering from objects at a water-sediment interface: Experiment, high-speed and high fidelity models, and physical insight. IEEE J. Ocean. Eng., 40, 632–642.
- Kretschmer, U.; Jans, W. (2016): Ortung von Altmunition im Meer – Beiträge aus der Forschungsarbeit der WTD 71. Hydrographische Nachrichten, 12–21.
- Lim, R. (2015): Data and processing tools for sonar classification of underwater UXO. SERDP Final Report, Distribution unlimited.
- OPSR Commission (2009): Assessment of the impact of dumped conventional and chemical munitions.
- SERDP/Office of Naval Research (2013): Workshop on acoustic detection and classification of UXO in the underwater environment. Final report, Distribution unlimited.
- Sternlicht D.; Pesaturo, J. F. (2004): Synthetic aperture sonar: Frontiers in underwater imaging. Sea Technology, 45(11), 27–32.
- Sternlicht, D. D.; Harbaugh, J. K.; Shah, A. K.; Webb, M. L.; Holtzapple, R. (2006): Buried object classification using a sediment volume imaging SAS and electromagnetic gradiometer. Proc. MTS/IEEE Oceans.
- Sternlicht, D. D.; Fernandez, J. E.; Marston, T. M. (2012): Detecting, classifying mines with synthetic aperture acoustic tomography. Sea Technology, 53(11), 10–13.

- Voß, H.; Schäl, T. (2017): Deficiencies in AUV Mission Planning Exemplified by an UXO Survey. Proc. UACE, Skiathos, Greece, September 2017.
- Williams, K. L.; Kargl, S. G.; Thorsos, E. I.; Burnett, D. S.; Lopes, J. L.; Zampolli, M.; Marston, P. L. (2010): Acoustic scattering from an aluminum cylinder in contact with a sand sediment: Measurements, modeling, and interpretation. *J. Acoust. Soc. Am.*, 127, 3356–3371.
- Winkelmann, K. (2014): State of the art in commercial offshore unexploded ordnance detection. Proc. UACE, 1263–1270.

Contact

Dr. Wolfgang Jans
Bundeswehr Technical Centre for Ships and Naval Weapons,
Maritime Technology and Research (WTD 71)
Berliner Straße 115, 24340 Eckernförde
wolfgangjans@bundeswehr.org

Daniel D. Sternlicht
Naval Surface Warfare Center
Panama City Division, USA

Session 5: Einblicke in Wissenschaft und Zukunftstrends

Fusion von Sensoren mit optischer 3D-Messtechnik zur Positionierung von Unterwasserfahrzeugen

Robin Rofalski | Thomas Luhmann

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Nutzung des Wirtschaftsraumes Meer erfordert sich stets weiterentwickelnde Methoden und Systeme in verschiedenen Fachdisziplinen. Insbesondere in Gewässerbereichen, die ein hohes Gefährdungsrisiko für den Menschen bieten, wie es etwa bei havarierten Schiffen der Fall ist, gilt es effiziente Herangehensweisen zu finden, um Mensch und Umwelt keinen unnötigen Gefahren auszusetzen.

Derzeit entsteht, ähnlich wie bei der Kommerzialisierung der Flugdrohnen (UAVs), ein neuer Markt von günstigen (1000 bis 5000 Euro) Unterwasserfahrzeugen für eine kostensensiblere Nutzergruppe (Mini/Micro Remotely Operated Vehicles). Diese Fahrzeuge zeichnen sich dadurch aus, dass sie leicht transportierbar sind, Tauchtiefen von maximal 300 Metern ermöglichen und auch von weitgehend unerfahrenen Nutzern steuerbar sind. Beispiele sind der OpenROV Trident (ca. 1500 Euro), Deep Trekker DTG2 (ca. 5000 Euro) oder BlueRobotics BlueROV2 (ca. 3000 Euro). Diese, mit klassischen Observation oder Work Class ROVs nicht zu vergleichenden ROVs bieten eine Unterwasserplattform mit einfacher Sensorik, welche in der Lage ist auch zusätzliche Payload zu transportieren. Dadurch eröffnen sich der Wissenschaft neue Möglichkeiten, auch mit vergleichsweise geringen finanziellen Mitteln flexibel einsetzbare Systeme zu konfigurieren und neue kostengünstige Einsatzmöglichkeiten zu entwickeln.

Der vorliegende Beitrag entstammt dem Teilprojekt „Optische Unterwasser-3D-Messtechnik“ des interdisziplinären Projektes EITAMS („Entwicklung innovativer Technologien für autonome maritime Systeme“) an der Jade Hochschule. Ziel des Projektes ist die Entwicklung von preiswerten Systemkomponenten für flexibel konfigurierbare Fahrzeuganwendungen unter Wasser, von denen Wissenschaft und Wirtschaft durch niedrigere Kosten und neue Möglichkeiten profitieren können. Die in den einzelnen Teilprojekten entwickelten Komponenten sollen schließlich die Möglichkeit bieten zu einem Gesamtsystem

fusioniert zu werden, um autonome Aufgaben im maritimen Bereich wahrnehmen zu können.

In diesem Beitrag wird ein Konzept für ein Dreikamerasystem, fusioniert mit weiterer Sensorik aus dem Mittel- bis Niedrigpreissegment, zur Aufnahme von unter Wasser befindlichen Strukturen vorgestellt. Dies beinhaltet die Aufnahme von Unterwassergeländen, unterseeischen archäologischen Fundstellen sowie menschlich errichteten Strukturen. Das System ist in weiten Teilen modular und damit unabhängig von der hier gewählten Trägerplattform. Die konzeptionelle Basis ließe sich somit in alle Arten von bemannten und unbemannten Fahrzeugen integrieren.

1.2 Wissenschaftliche Einordnung

Multisensor- und Mobile-Mapping-Systeme sind seit Jahren Gegenstand aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, sowohl an Land, in der Luft als auch im Wasser. Insbesondere unter Wasser herrschen hohe Anforderungen an die verwendete Sensorik und es besteht ein großer Entwicklungsbedarf hinsichtlich zuverlässiger Systeme, welche insbesondere die Positionierung sicher lösen. Viele Ansätze nutzen sogenannte SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)-Algorithmen. Das SLAM-Problem ist die gleichzeitige Positionierung eines mobilen Roboters und die Kartierung in einer unbekannten Umgebung und damit eine der Grundlagen für autonome Plattformen. Erste Ansätze finden sich bereits in den späten 1980er Jahren (Smith et al. 1986, Leonard und Durrant-Whyte 1991), wobei erst mit steigender Rechenkapazität Anfang des 21. Jahrhunderts viele echtzeitfähige operationelle Lösungen das Problem populär gemacht haben. Auf optische Sensoren angepasste Verfahren werden mit Visual SLAM bezeichnet, wie beispielsweise die Ansätze für Stereokameras in Engel et al. (2015) oder Mur-Artal et al. (2017). Als Spezialfall des SLAM-Problems ist die visuelle Odometrie einzuordnen. Auch hier wird bildbasiert nach der Position eines mobilen Roboters in unbekannter Umgebung gesucht. Jedoch werden hierbei die Objektpunkte der Umgebung lediglich zur lokalen Positionsbestimmung des Roboters herangezogen und nicht zu einer konsistenten globalen Karte zusammengefasst (Nistér et al. 2004).

Zur visuellen Navigation werden Kameras schon seit Beginn der Nutzung von ROVs in den 1960er Jahren eingesetzt und stellen eine Grundvoraussetzung für diese dar. Trotz der resultierenden weiten Verfügbarkeit ist die Nutzung der Kamerabilder für 3D-messtechnische Anwendungen technisch bedingt lange Zeit eher die Ausnahme gewesen. Erst in den 1990er Jahren wurden Algorithmen zur 3D-Rekonstruktion und Positionierung aus Bilddaten von bemannten und unbemannten Unterwasserfahrzeugen veröffentlicht (Santos-Victor und Sentieiro 1995, Gracias und Santos-Victor 2000). SLAM- und visuelle Odometrie-Ansätze

finden sich für Unterwasseranwendungen beispielsweise bei Mahon und Williams (2004). Hier wird ein Ansatz ohne Refraktionskorrektur zur Kartierung und Positionierung im Great Barrier Reef in Australien dargestellt. Ein weiterer Ansatz findet sich bei Servos et al. (2013), die eine SLAM-Implementierung mit integrierter Refraktionskorrektur für einen Mehrmedienübergang vorstellen. Nach Kenntnisstand der Autoren existieren keine weiteren Veröffentlichungen, welche eine Lösung für das SLAM-Problem mit integrierter Mehrmedienkorrektur beschreiben. Weitere Anwendungen von Bildern unter Wasser sind Objekterkennung, Steuerung von Aktoren (visual servoing) und die Erstellung von Bildmosaiken vom Meeresgrund (z. B. Bonin-Font et al. 2015).

2 Mehrkamerasytem

Als Versuchsplattform wurde der BlueROV2 der Firma Blue Robotics gewählt (Abb. 1). Dieser Mini-ROV mit einer maximalen Tauchtiefe von 100 Metern bietet sechs Antriebe mit einer maximalen Geschwindigkeit von 1 m/s. Die leichte Bauweise (ca. 10 kg) und vergleichsweise starken Antriebe ermöglicht dem ROV außerdem die Integration eines zusätzlichen Rahmens für drei Druckgehäuse. Dieser bietet Platz für zusätzliche Sensorik, wie das hier vorgestellte Dreikamerasytem und weitere Komponenten. Hard- und Steuersoftwarekomponenten sind hierbei Open-Source, sodass Anpassungen an spezielle Problemstellungen, wie etwa der Integration einer autonomen Steuersoftware, möglich sind.

Das Dreikamerasytem besteht aus zwei vor- und einer rückblickenden Industriekamera des Typs „Basler Ace“ mit einer Brennweite von 4,8 mm. Die Brennweite im Weitwinkelbereich wurde gewählt, um bei geringen Sichtweiten, wie sie in natürlichen Gewässern üblich sind, eine möglichst große Objekt-



Abb. 1:
BlueROV2

abdeckung auf kurze Distanz zu gewährleisten. Bei einer Objektentfernung von 1 m beträgt die Ground Sample Distance (GSD) 1 mm, was für die Aufnahme und Positionierung in submarinen Umgebungen als ausreichend angesehen wird. Mithilfe der dritten rückblickenden Kamera sollen sequenzielle Auswerteverfahren eine robustere geometrische Basis erhalten, als es klassische Stereokonfigurationen ermöglichen. Die weiteren relevanten Kameraspezifikationen finden sich in [Tab. 1](#).

Durch die kompakte Bauweise können die Kameras in 3"-Druckgehäuse integriert werden und lassen noch Raum für weitere Hardware ([Abb. 2](#) links). Die Kameras sind in eigens entwickelten Arretierungen aus Aluminium eingefasst, welche sie mithilfe von Gummiringen starr entlang der Längsachse des Gehäuses feststellen ([Abb. 2](#) rechts). Die Druckgehäuse sind wiederum mit zwei Schellen an einer Aluminiumplatte mit wasserresistenter Legierung befestigt, um eine möglichst stabile relative Orientierung der Kameras zu gewährleisten.

Durch die Unterstützung von Power-over-Ethernet wird jede Kamera lediglich mit einem Ethernet Kabel zur Strom- und Datenverbindung von der Oberfläche versorgt. Die Synchronisation der Kameras untereinander und mit weiteren

Tab. 1: Kamera- und Objektivparameter

Sensorgröße	9,2 mm × 5,8 mm
Auflösung	1920 px × 1200 px
Max. Bildrate	50 Hz
Pixelgröße	4,8 µm × 4,8 µm
Gehäusegröße	42 mm × 29 mm × 29 mm
Brennweite	4,8 mm

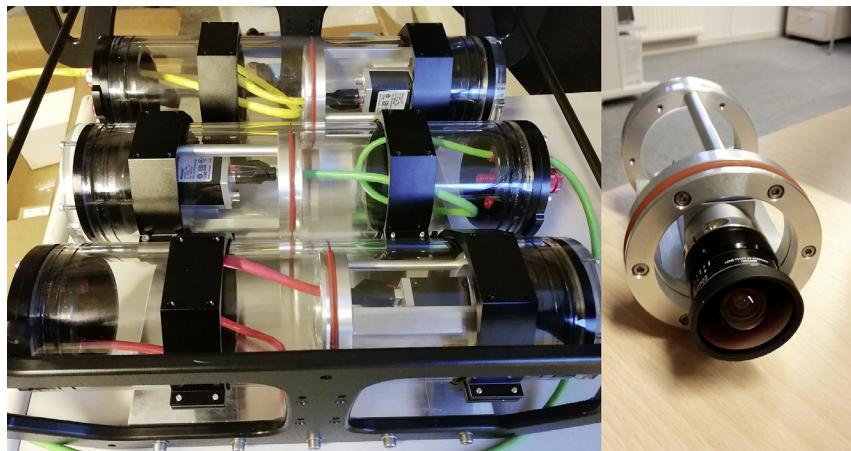


Abb. 2: Rahmen mit drei Druckgehäusen (links) und Arretierung aus Aluminium für die Kameras zur Fixierung innerhalb der Druckgehäuse (rechts)

Sensoren wird mittels galvanischer Auslösung durch die zentrale Steuereinheit des BlueROV gewährleistet. Eine C++ API ermöglicht die volle Kontrolle und Automatisierung der Bildaufnahme und -verarbeitung.

3 Datenauswertung

Die Steuerung aller Prozesse des BlueROV2 wird durch die Middleware „Unified Navigation Environment“ (DUNE) realisiert (Pinto et al. 2013). Diese Open-Source-Software ist auf den Einsatz auf unbemannten Fahrzeugen unter Wasser und in der Luft angepasst. Der mitgelieferte Funktionsumfang befasst sich u. a. mit Hardwareabstraktion, Positionierung unter Wasser und Echtzeitauswertung von Sensordaten. Für Analysen nach einer abgeschlossenen Mission werden sämtliche Daten in einer Log-Datei abgespeichert. Im Rahmen der Software können eigene Auswertungen in separaten Programmen implementiert und an die Software übergeben werden. Dadurch können verschiedene Sensoren oder Verarbeitungsprozesse ihre Daten im System veröffentlichen und anschließend an beliebig viele anknüpfende Prozessen im Listener-Prinzip verteilt werden (Publish-Subscribe-Pattern).

3.1 Auswertung der Bilddaten

Photogrammetrische Aufnahmen werden in der Regel unter Annahme des Lochkameramodells, erweitert um sensor- und objektivabhängige Verzeichnungsparameter, mithilfe der Kollinearitätsgleichungen ausgewertet (Luhmann 2018). Diese setzen einen geradlinigen Strahlverlauf zwischen Objektpunkt und Bildpunkt voraus. Im Falle von unter Wasser aufgenommenen Bilddaten gilt diese Annahme jedoch nicht, da sich die verschiedenen Medienübergänge im Strahlengang, lichtbrechend auswirken und dadurch den Verlauf verändern. Unter Annahme einer planparallelen Anordnung der Trennfläche zum Kamera-sensor, ergibt sich ein radialer Versatz am Objektpunkt, welcher beispielsweise durch den Ansatz in Maas (1992) korrigiert und in das Modell der Lochkamera zurückgeführt werden kann (siehe Abb. 3). Weitere Korrekturansätze sind auch bei Kotowski (1987) und als Integration in eine Bündelausgleichung bei Mulsow (2010) zu finden. Hier wird ein Strahlverfolgungsansatz (Raytracing) zur strengen Berechnung der Abbildungsfunktion durch beliebig viele Medien (Wasser, Trennscheibe) vorgestellt.

Weitere medienspezifische Probleme ergeben sich durch die möglichen kurzen Sichtweiten, den verringerten Kontrast der Umgebung, Dispersion sowie eine Vielzahl von Schwebepartikeln, welche die Mehrbildzuordnung erheblich beeinträchtigen können.

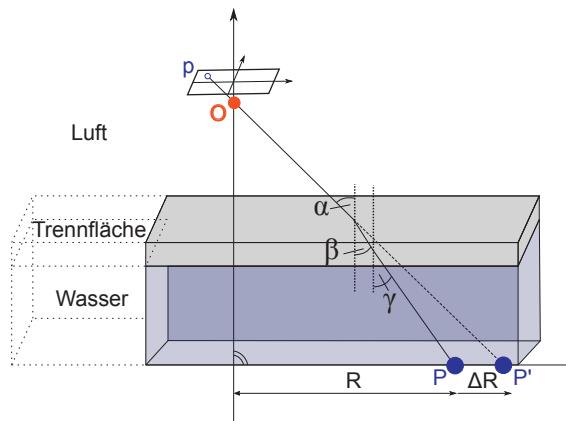


Abb. 3:
Refraktion in der Mehr-medienphotogrammetrie. Durch die Brechung an den beiden Medienübergängen Luft/Trennfläche und Trennfläche/Wasser trifft der Strahl um einen radialen Versatz ΔR am Objekt auf. (In Anlehnung an Maas 1992)

Bei der Auswertung von Daten mobiler Systeme lässt sich generell zwischen der Online- und der Offline-Auswertung unterscheiden. Online-Verfahren werten die Bilddaten eines vorab kalibrierten Mehrkamerasystems sequenziell und während der Billaufnahme aus. Unter die Online-Verfahren fallen beispielsweise Lösungen des SLAM-Problems und der visuellen Odometrie.

Klassische Herangehensweise bei Offline-Verfahren ist die rechenintensive photogrammetrische Bündelausgleichung, bei der sämtliche Bild- und Sensorsdaten einbezogen werden können, um eine statistisch optimale Lösung zu ermitteln. Entsprechend der gesetzten Anforderungen, bieten beide Herangehensweisen für unbemannte Systeme Vor- und Nachteile, welche in [Tab. 2](#) zusammengefasst werden.

Die dynamischen Bilddaten sollen aufgrund der Möglichkeit zur Unterstützung autonomer Aufgaben mit einem Online-Verfahren zur Missionslaufzeit ausgewertet werden. Der derzeitige Stand einer Implementierung für visuelle Odometrie ist in [Abb. 4](#) zu sehen.

Tab. 2: Eigenschaften von Online- und Offline-Auswertung

	Online	Offline
Genauigkeit	Sinkt mit der Missionszeit	Unabhängig von der Missionszeit
Kontrollierbarkeit auf Vollständigkeit in situ	Möglich	Nicht möglich
Anpassung des Missionspfades in situ	Möglich	Nicht möglich
Kollisionsvermeidung	Möglich	Nicht möglich

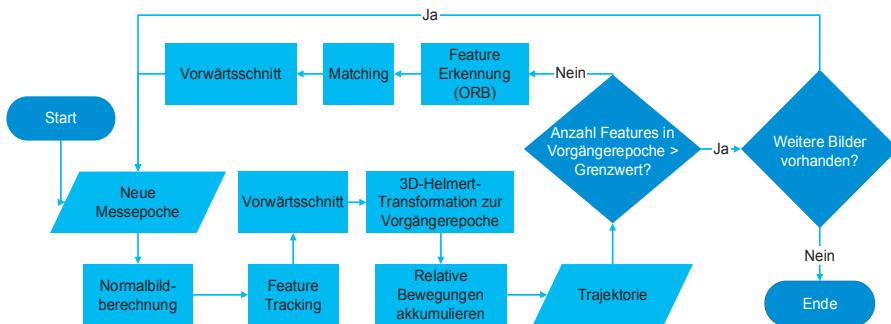


Abb. 4: Vereinfachtes Flussdiagramm der aktuellen Version einer visuellen Odometrie

Das merkmalbasierte Verfahren nutzt bislang klassische photogrammetrische und geodätische Berechnungsmethoden, wie eine räumliche Helmert-Transformation mit festem Maßstab oder Vorwärtsschnitte: Für jeden Epochenschritt werden Merkmalspunkte, welche mit dem ORB-Deskriptor beschrieben werden (Rublee et al. 2011) mittels optischem Fluss verfolgt. Durch Vorwärtsschnitte werden anschließend Objektpunkte berechnet, welche auf die vorherige Epoche mittels 3D-Helmert-Transformation (6 Parameter) transformiert werden. Daraus resultiert die relative Bewegung zur Vorgängerepoche, welche für sämtliche Bilder akkumuliert wird. Weitere Schritte hinsichtlich der gemeinsamen sequenziellen Orientierung der gesamten Trajektorie in einer Bündelausgleichung über die letzten n Bilder sollen künftig implementiert werden, um eine konsistente Punktwolke und eine verbesserte Trajektorie zu erhalten und schließlich zu einer SLAM-Lösung führen. Eine Beispieltrajektorie aus einer Büroszene, welche mit der aktuellen Implementierung ausgewertet wurde, ist in Abb. 5 zu sehen. Es ist erkennbar, dass die Punktwolke nicht konsistent ist, da keine Verbesserung der Punkte aus mehreren Epochen stattfindet und gleiche Punkte, welche in verschiedenen Epochen gemessen wurden, nicht zusammengefasst werden. Dies wird mit künftigen Entwicklungen berücksichtigt.

Die Einbindung der dritten Kamera stellt eine besondere Herausforderung dar: Da die rückwärtige Kamera kein mit den vorblickenden Kameras überlappendes Blickfeld besitzt, werden Merkmale, welche vom Stereopaar gesehen werden, mit einem Zeitversatz aus einem unterschiedlichen Blickwinkel erfasst. Die direkte Korrespondenzanalyse zwischen den Bildern ist daher schwach konditioniert und nur schwer im praktischen Gebrauch umzusetzen.

Ein möglicher Ansatz ist daher die separate Auswertung der rückblickenden Kamera in einer separaten Punktwolke, welche durch die fest kalibrierte Basis zum Stereopaar mit dessen Punkten verknüpft wird. Dadurch wird die merkmalbasierte Korrespondenzanalyse im Bild durch eine räumliche Helmert-Transformation mit iterativer Passpunktsuche ersetzt.

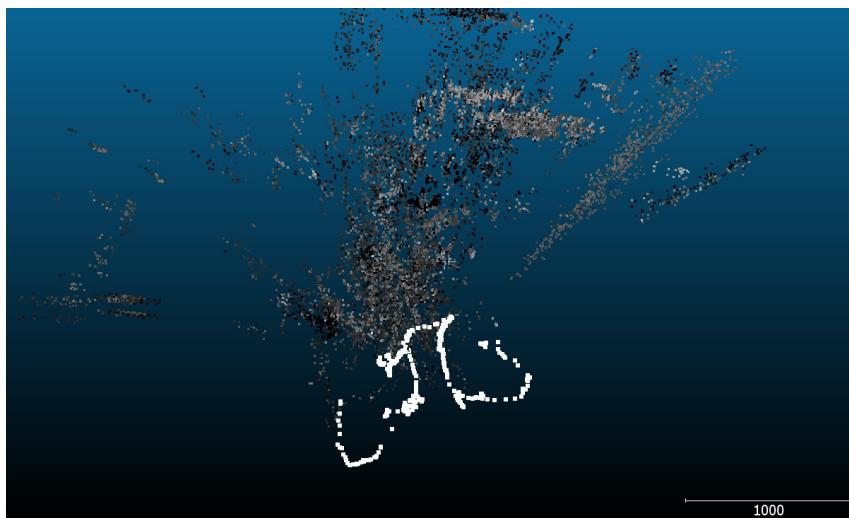


Abb. 5: Erstes Ergebnis des entwickelten Ansatzes zur visuellen Odometrie. Weiß: Kamera-positionen; Graustufen: Objektpunkte aus allen Epochen, transformiert in das Koordinatensystem der Ursprungsepoke

3.2 Auswertung weiterer Sensordaten

Die Bildqualität und Beleuchtungsbedingungen unter Wasser sind zwar generell schlechter als an Luft und erschweren insbesondere im Bereich der norddeutschen Küsten eine dreidimensionale Auswertung. Dennoch bieten Kameras eine höhere zeitliche und geometrische Auflösung, als es schallbasierte Sensoren können und vermögen dadurch einen Mehrwert zu generieren. Sequenziell ausgewertete Bilddaten unterliegen jedoch akkumulierten Driften, welche mit zunehmender Epochenzahl näherungsweise linear ansteigen.

Um diesen Umständen entgegen zu wirken, werden weitere Sensoren zu einem Multisensorsystem fusioniert. Derzeit vorhandene Sensorik beinhaltet ein Ultra Short Baseline (USBL)-System der Firma Evologics und eine einfache MEMS-basierte inertiale Messeinheit (IMU), welche im integrierten Autopilot des BlueROV2 verbaut ist. Die IMU kann aufgrund von quadratisch zunehmenden Abweichungen lediglich in sehr kurzen Zeitfenstern von wenigen Sekunden Daten von ausreichender Genauigkeit produzieren, um das genutzte Online-Verfahren zu stützen. Die vom Hersteller spezifizierte Genauigkeit des USBL-Systems beträgt bis zu 0,01 m (Evologics 2018). Empirische Untersuchungen in Guerrero Font et al. (2016) zeigen jedoch eine zu erwartende XYZ-Genauigkeit von ca. 0,5 m im praktischen Einsatzbereich bis zu einer Distanz von 100 m.

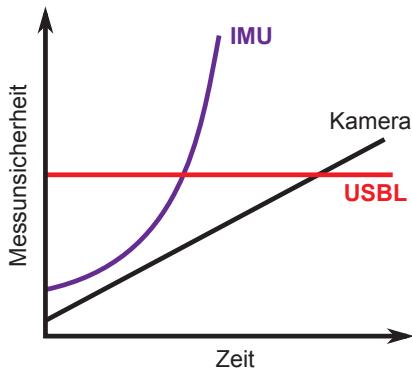


Abb. 6: Schematisches Verhältnis der einzelnen Sensorgenaugkeiten in Abhängigkeit von der Zeit

Da die Beobachtungen des USBL auf eine absolute GNSS-basierte Position in einem globalen Koordinatensystem referenziert werden können, unterliegen diese jedoch keiner Drift. Weitere Sensoren, wie ein Sonarsystem, werden gegebenenfalls zu einem späteren Zeitpunkt hinzugefügt, wobei auch hier auf kostengünstige Komponenten zurückgegriffen werden soll.

Eine filterbasierte Fusionierung der einzelnen Sensoren sorgt für eine Gesamtsystemgenauigkeit, welche aufgrund der Redundanzen höher ist als jene der einzelnen Systemkomponenten (Abb. 6).

3.3 Verknüpfung der Sensordaten

Zentrale Aufgabenstellung ist die Bestimmung der Position des Unterwasserfahrzeugs sowohl in einem lokalen als auch in einem übergeordneten Koordinatensystem mittels einer Online-Auswertung. Nach abgeschlossener Mission kann zusätzlich eine Offline-Auswertung mit Bündelausgleichung unter Einbezug sämtlicher Sensordaten erfolgen. Eine mögliche Abfolge der einzelnen Verfahrensschritte findet sich in Abb. 7.

Zunächst werden mittels Kalibrierung die sensorinhärenten Fehler kalibriert. Im Falle der Kameras sind dies die Parameter der inneren Orientierung gemäß dem Modell nach Brown. Weiterhin sind die systematischen Abweichungen innerhalb der inertialen Messeinheit, wie Nullablagen, Nichtlinearitäten oder Scherung der Sensorachsen zu bestimmen. Das USBL-System wird herstellerseitig kalibriert. Diese Parameter werden für weitere Auswertungen angenommen.

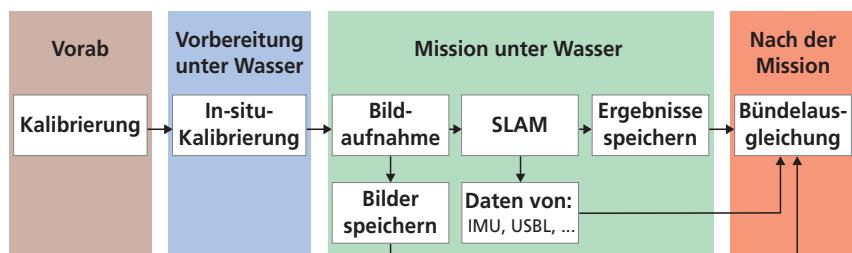


Abb. 7: Möglicher Missionsablauf

men. Zur Bestimmung der relativen Orientierung der drei Kameras wurde ein Kalibrierraum entworfen, welcher mit einer Größe von ca. $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2,3\text{ m}$ an allen Wänden mit photogrammetrischen Messmarken ausgestattet ist. Durch die gleichzeitige Beobachtung an den rück- und vorderseitigen Kameras und Rotation des Systems um die vertikale Achse können die Kameras auch ohne überlappendes Sichtfeld zueinander kalibriert und gleichzeitig die innere Orientierung bestimmt werden. Basierend auf der Kalibrierung der inneren Orientierung kann anschließend unter Wasser eine reduzierte in-situ-Kalibrierprozedur durchgeführt werden, um die medienspezifischen Refraktionsindizes zu bestimmen und gegebenenfalls zu überprüfen, ob die vorab bestimmte relative Orientierung noch Gültigkeit besitzt. Weiterhin ist die relative Orientierung der IMU und des USBL-Systems zu bestimmen. Ansätze für eine Kamera zu IMU-Orientierung finden sich beispielsweise in Mirzaei und Roumeliotis (2008) oder Kleinert und Stilla (2014).

Mit Beginn der Datenaufnahme wird die zuvor beschriebene Online-Auswertung mittels visueller Odometrie oder SLAM unter Berücksichtigung der weiteren Sensoren in einem Filter durchgeführt. Nach Abschluss der Mission werden sämtliche Daten in einer separaten Bündelausgleichung ausgewertet, um unabhängig von Echtzeitanforderungen ein statistisch optimales Ergebnis zu bestimmen.

4 Ausblick

Grundlegende Entwicklungsarbeiten zur Konstruktion eines stabilen Mehrkamerasystems befinden sich in der Endphase, sodass der Fokus der Forschungsarbeiten künftig auf die Verbesserung der Online-Auswertung der Bilddaten gelegt wird. Die Anpassung des Programmcodes zur Einbindung von frei verfügbaren Bibliotheken, wie g^2o zur graph basierten Auswertung von SLAM-Problemen (Kümmerle et al. 2011) oder *Mobile Robot Programming Toolkit* (www.mrpt.org) wird hinsichtlich Performancesteigerung und statistischer Kontrollierbarkeit getestet. Weiterhin wird die dritte Kamera in die Online-Auswertung integriert und der resultierende Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsgewinn evaluiert.

Zur strengen Mehrmedienkorrektur werden weiterhin die vorgestellten Ansätze aus Kap. 3.1 evaluiert und gegebenenfalls sowohl in einer Onlineauswertung als auch in einer Bündelausgleichung implementiert.

Nach vollständiger Integration der weiteren Sensorik soll schließlich ein Multisensorsystem entstehen, welches hinsichtlich verschiedener Genauigkeitsaspekte untersucht werden kann. Hierfür werden diverse Testszenarien entworfen, in denen sowohl die äußere Genauigkeit der Trajektorie als auch die

innere Genauigkeit der resultierenden Objektpunkte evaluiert wird. Zur Untersuchung unter kontrollierten Bedingungen steht ein Testbecken der Größe 20 m × 10 m × 5 m bereit.

Mit dem vorgestellten System steht eine vergleichsweise kostengünstige Möglichkeit zur Aufnahme von unter Wasser befindlichen Strukturen bereit. So kann beispielsweise die Aufnahme von submarinen Cultural Heritage Objekten günstig für Museums- und Verwaltungsinstitutionen durchgeführt werden. Auch Hafen- und andere maritime Infrastrukturgebiete können durch das System erfasst und die Daten z. B. zur detaillierten Schadensdokumentation herangezogen werden.

Literatur

- Bonin-Font, F.; Oliver, G.; Wirth, S.; Massot, M.; Lluis Negre, P.; Beltran, J. (2015): Visual sensing for autonomous underwater exploration and intervention tasks. In: *Ocean Engineering* 93, 25–44.
- Engel, J.; Stückler, J.; Cremers, D. (2015): Large-scale direct SLAM with stereo cameras. In: *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Hamburg: IEEE, 1935–1942.
- Evologics (2018): USBL Positioning and Communication Systems – Product Information Guide. www.evologics.de/files/DataSheets/EvoLogics_S2CR_USBL_a4_WEB.pdf, letzter Zugriff 04/2018.
- Gracias, N.; Santos-Victor, J. (2000): Underwater Video Mosaics as Visual Navigation Maps. In: *Computer Vision and Image Understanding* 79 (1), 66–91.
- Guerrero Font, E.; Bonin-Font, F.; Negre, P.; Massot, M.; Oliver, G. (2017): USBL Integration and Assessment in a Multisensor Navigation Approach for AUVs. In: *IFAC-PapersOnLine* 50 (1), 7905–7910.
- Kleinert, M.; Stilla, U. (2014): Camera-IMU Calibration Using a Tilted Calibration Board. In: Seyfert, E.; Gülich, E.; Heipke, C.; Schiewe, J.; Sester, M. (Hrsg.): *Geoinformationen Öffnen das Tor zur Welt. 34. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Hamburg*.
- Kotowski, R. (1987): Zur Berücksichtigung lichtbrechender Flächen im Strahlenbündel. Zugl. Diss.: Universität Bonn. München: Beck (Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften Reihe C, 330).
- Kümmeler, R.; Grisetti, G.; Strasdat, H.; Konolige, K.; Burgard, W. (2011): g^2o : A general framework for graph optimization. In: Antonio Bicchi (Hrsg.): *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 9–13 May 2011, Shanghai, China*. Piscataway, NJ: IEEE, 3607–3613.
- Leonard, J. J.; Durrant-Whyte, H. F. (1991): Mobile robot localization by tracking geometric beacons. In: *IEEE Trans. Robot. Automat.* 7 (3), 376–382.
- Luhmann, T. (2018): *Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Systeme, Beispiele*. 4. Aufl., Wichmann Verlag, Offenbach/Berlin.
- Maas, H.-G. (1992): *Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik*. Diss. Techn. Wiss. ETH Zürich, Nr. 9665.

- Mahon, I.; Williams, S. (2004): SLAM using natural features in an underwater environment. In: 8th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. 2004, ICARCV 2004. 6–9 Dec. 2004; Institute of Electrical and Electronics Engineers; Piscataway, NJ: IEEE Operations Center, 2076–2081.
- Mirzaei, F. M.; Roumeliotis, S. I. (2008): A Kalman Filter-Based Algorithm for IMU-Camera Calibration: Observability Analysis and Performance Evaluation. In: IEEE Trans. Robot. 24 (5), 1143–1156.
- Mulsow, C. (2010): A Flexible Multi-media Bundle Approach. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2010, 38, 472–477.
- Mur-Artal, R.; Tardos, J. D. (2017): ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras. In: IEEE Trans. Robot. 33 (5), 1255–1262.
- Nistér, D.; Naroditsky, O.; Bergen, J. (2004): Visual odometry. In: CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition: Washington, D.C., USA, IEEE Computer Society, 652–659.
- Pinto, J.; Dias, P. S.; Martins, R.; Fortuna, J.; Marques, E.; Sousa, J. (2013): The LSTS tool-chain for networked vehicle systems. In: 2013 MTS/IEEE OCEANS – Bergen. 2013 MTS/IEEE OCEANS. Bergen, 6/10/2013 – 6/14/2013: IEEE, 1–9.
- Rublee, E.; Rabaud, V.; Konolige, K.; Bradski, G. (2011): ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. In: IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2011. 6–13 Nov. 2011, Barcelona, Spain. Institute of Electrical and Electronics Engineers; Piscataway, NJ: IEEE, 2564–2571.
- Santos-Victor, J.; Sentieiro, J. (1994): The role of vision for underwater vehicles. In: Proceedings of the 1994 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology. July 19 and 20, 1994, Cambridge, Massachusetts. Oceanic Engineering Society (U.S.). New York, N.Y., Piscataway, NJ: IEEE, 28–35.
- Servos, J.; Smart, M.; Waslander, S. L. (2013): Underwater stereo SLAM with refraction correction. In: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 3–7 Nov. 2013, Tokyo, Japan. IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway, NJ: IEEE, 3350–3355.
- Smith, R.; Self, M.; Cheeseman, P. (1987): Estimating uncertain spatial relationships in robotics. In: Proceedings. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Raleigh, NC, USA.

Kontakt

Robin Rofallski, M.Sc. | Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Thomas Luhmann
Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik
Jade Hochschule Wilhelmshaven Oldenburg Elsfleth
Ofener Straße 16/19, 26121 Oldenburg
robin.rofallski@jade-hs.de | thomas.luhmann@jade.hs.de

Erkundung und Kartographierung des Jupitermondes Europa – Vollautonome Langzeitmissionen mit Unterwasserfahrzeugen

Marc Hildebrandt

1 Einleitung

Auf dem Jupitermond Europa wird unter einer Eisdicke von 3 bis 15 km ein ca. 100 km tiefer Ozean aus flüssigem Wasser vermutet (siehe dazu Moore 2009). Des Weiteren geht man davon aus, dass sich am Grund des Ozeans heiße Quellen gebildet haben und sich dort, wie auf der Erde, Bakterien befinden könnten (Roth 2013). Eine Untersuchung dieser heißen Quellen könnte also wichtige Informationen liefern, wie Leben auf der Erde entstanden ist. Für die Erkundung dieses Ozeans wäre ein vollautonomes System notwendig, da die Signalverzögerung zwischen Bodenstation und Erkundungsfahrzeug ca. 30 bis 53 Minuten betrüge, was die Fernsteuerung eines in der Wassersäule schwebenden Systems praktisch ausschließt und zudem für eine zuverlässige Kommunikation über 100 km durch Wasser und Eis zu einem Fahrzeug und zurück zur Zeit keine technische Lösung ersichtlich ist. Dieses System müsste die folgenden Aufgaben durchführen können:

- Durchbrechen des Eisschildes
- Ausbringen eines Erkundungs-AUVs
- Absinken des AUVs bis zum Meeresgrund
- Vollautonome Exploration und Sammeln von Messdaten
- Rückkehr zur Eintrittsstelle
- Andocken an den Eisbohrer
- Übertragen der gesammelten Daten
- Bei Versuchen auf der Erde: Rückkehr zur Oberfläche

Im Rahmen des Projekts Europa-Explorer sollte der Machbarkeitsnachweis einer solchen Teilmision in einem terrestrischen Szenario geführt werden. Dabei lag das Hauptaugenmerk auf den beiden Aspekten sichere Navigation unter Eis sowie Integration aller Teilkomponenten in ein funktionales autonomes Gesamtsystem aus Penetrationssystem und Erkundungssystem. Eine potenzielle Mission wurde im Rahmen einer Machbarkeitsanalyse unter Kooperation mit

dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung untersucht. Dafür wurden in einem zweistufigen Prozess zuerst die genauen zu erwartenden Umgebungsbedingungen für die Mission auf Europa ermittelt, die dann als Grundlage für Validierungsversuche in der terrestrischen Umgebung dienten. Im zweiten Schritt wurde das innerhalb von Europa-Explorer erarbeitete Missionskonzept auf seine Eignung im Detail überprüft.

1.1 Missionskonzept

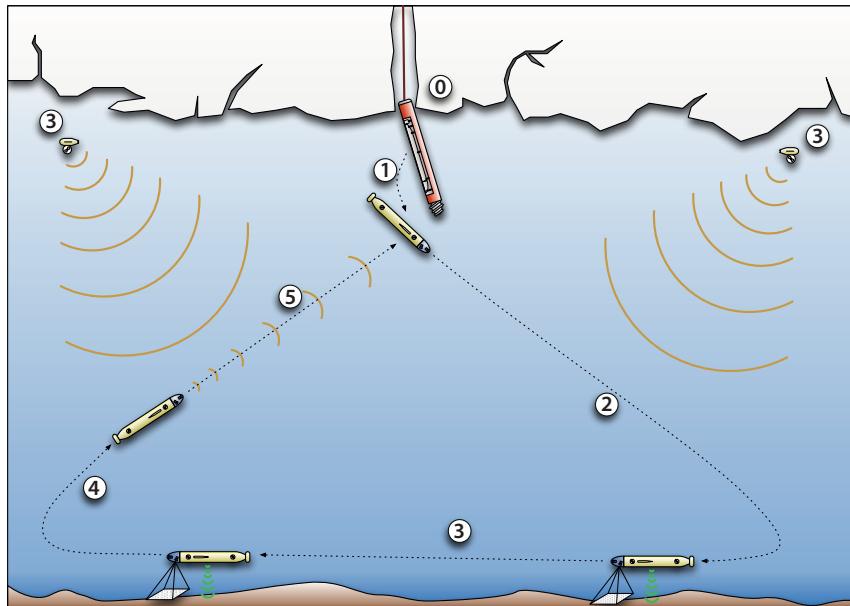


Abb. 1: Missionsablauf. 0: IceShuttle durchbricht Eispanzer, 1: AUV wird abgedockt, 2: AUV sinkt zum Grund des Ozeans, 3: Micro-Glider spannen LBL-Netz auf, 4: AUV untersucht Boden und steigt wieder zur Oberfläche auf, 5: AUV findet IceShuttle und Dockt.

In Abb. 1 ist das Missionskonzept dargestellt. Es geht von zwei vollautonomen Systemen aus: Dem IceShuttle, das als Transferfahrzeug durch die Eisdecke sowie als Dockingstation dient, und dem Erkundungs-AUV.

Das Missionskonzept beinhaltet eine Reihe von Herausforderungen, die während einer Mission von den beteiligten Systemen bewältigt werden müssen. Zuerst sind Anforderungen an die Navigation zu nennen. Da Hydrothermalquellen sich nur auf dem Grund des Ozeans befinden können, muss dieser erkundet werden. Das AUV muss also in der Lage sein, am Ende einer Mission auf eine Distanz von mehr als 100 km seine Eintrittsstelle (und damit die Position des

IceShuttles) wieder zu finden, also eine 30 cm große Stelle verlässlich anzufahren. Dies wird nur mit einer Verschachtelung mehrerer Navigationsmodalitäten möglich sein.

Neben der Navigationsproblematik stellen die langen zurückzulegenden Strecken ein Energieproblem dar. Würde man mit konventionellen Methoden, also propellergesteuerten Fahrzeugen, versuchen, eine Strecke von 100 km zu überbrücken, wären unverhältnismäßig große Batterien bzw. Akkus notwendig. Um dies zu vermeiden, wurde das AUV mit zwei Tauchzellen ausgestattet, die ein passives Auf- und Abtauchen ermöglichen.

2 Explorations-AUV „Leng“

Das Explorations-AUV (siehe Abb. 2) wurde auf den Namen „Leng“ getauft. Es ist mit 210 mm Durchmesser sehr schlank, um in das IceShuttle zu passen, dafür mit knapp 4 m sehr lang. Aufgebaut ist es als teilgeflutetes System, das von einer Strömungshülle aus GFK umhüllt wird. Die Elektronikkomponenten und Sensoren sind in Druckhüllen aus Aluminium verbaut, die miteinander über Unterwasserkabel verbunden sind. Insgesamt wiegt es 73 kg.

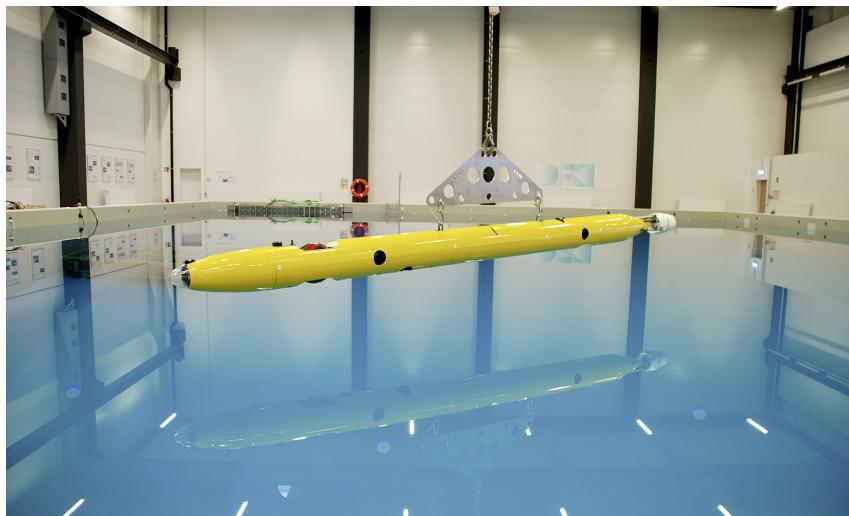


Abb. 2: Explorations-AUV Leng in der Maritimen Testhalle des DFKI-RIC Bremen

Angetrieben wird es von einer Hauptschubdüse im Heck, die um jeweils 30° in Längs- und Querachse schwenkbar ist. Dies ermöglicht dynamisches Tauchen und Manövrieren. Zur Präzisionsnavigation, die z. B. beim Docking benötigt

wird, dienen zwei Querstrahldüsen, die es dem System ermöglichen, auch auf engem Raum seitlich zu versetzen oder zu drehen. Die Tiefe wird im statischen Betrieb von zwei mechanischen Tauchzellen gesteuert, die durch Kompression von Luft im Inneren der Druckkörper eine Dichteänderung des im Normalfall neutral getrimmten Fahrzeuges bewirken. Dadurch kann neben dem Tauchen auch der Anstellwinkel im Bereich $\pm 75^\circ$ frei gewählt werden.

Die Energieversorgung wird durch den 1,3 kWh großen Hauptakkumulator aus Lithium-Ionen-Zellen gewährleistet. Dieser ermöglicht einen Betrieb von ca. 8 bis 10 Stunden unter Bewegung.

Das AUV ist umfassend mit Sensoren ausgestattet: Zu den Navigationssensoren gehören neben einem Drucksensor (Tiefenmessung) ein 3-Achs-Faseroptisches Gyroskop (Raumwinkelmessung) sowie ein Doppelkopf-DVL (Geschwindigkeit über Grund/unter Eis). Zur Positionierung relativ zum IceShuttle dienen ein USBL-System (relativer Abstand & Raumwinkel bis 2 km Reichweite) sowie ein Stereo-Hydrophon (relativer Raumwinkel). Die Stereo-Hydrophone werden auch als Empfänger des LBL-Signals verwendet. Für den Docking-Vorgang sitzt am Bug eine Kamera, zwei weitere Kameras sind in einer Stereo-Konfiguration nach unten ausgerichtet. Die Beleuchtung erfolgt mit gepulsten LEDs.

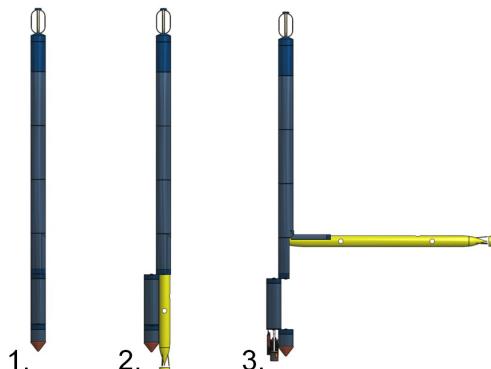
Die Navigationssteuerung übernehmen zwei PC-Systeme in der Hauptdruckhülle. Während der Mission werden die Daten aller Sensoren zur späteren Weiterverarbeitung aufgezeichnet. Zusätzlich muss aber ein Großteil der Sensoren auch während der Mission bereits evaluiert werden, um den Betrieb vollautonom zu ermöglichen.

3 IceShuttle und Docking

Die Aufgaben des IceShuttles sind vielfältig: Zum Einen muss es das Erkundungs-AUV durch den 3 bis 15 km dicken Eispanzer transportieren, zum Anderen aber an der Eiskante angekommen auch als Docking- und Sensorstation dienen. Der Eispanzer wird durch Erhitzen der Spitze des IceShuttles durch Schmelzbohren durchdrungen. Ein Spreizankersystem am Heck verhindert ein Versinken des IceShuttles nach Erreichen des Ozeans. Um das AUV und die Sensoren ausbringen zu können, muss der untere Teil des IceShuttles eine mehrschrittige Transformation durchlaufen (siehe auch Abb. 3): Zuerst muss die ganze untere Sektion zur Seite schwenken, um dem AUV Platz zu machen. Nachdem das AUV sich in die Horizontale gebracht hat, wird der Schmelzkopf erneut zur Seite geschwenkt und die Lokalisationssensorik ausgebracht. Für terrestrische Versuche ist zudem eine Reintegration des AUVs möglich, indem dieser Vorgang rückwärts ablaufen kann, damit das IceShuttle nach einem Versuch per Seilwinde wieder an die Oberfläche geholt werden kann.

Abb. 3:

Transformation des IceShuttles zum Ausbringen des Explorations-AUVs. 1: Zustand während des Eisbohrens. 2: Sensoreinheit schwenkt zur Seite, AUV wird vertikal ausgebracht. 3: AUV schwenkt in die Horizontale, Sensoren des IceShuttles werden ausgefahren.



Ein wichtiger Aspekt ist die Fähigkeit des AUVs, zum IceShuttle zurückzufinden und an ihm zu docken. Im Fernbereich (> 2 km Abstand) wird wie oben bereits skizziert ein Stereo-Hydrophon in Verbindung eines LBL-Systems zur Relativpositionierung verwendet. Sobald sich das AUV auf 2 km angenähert hat, kann das USBL Raumwinkel und Abstand bestimmen und über einen akustischen Rückkanal (Reverse-USBL) diese Daten an das AUV übermitteln. Daraufhin ist ein Homing möglich, also das kontrollierte Anfahren der USBL-Position und damit des IceShuttles (Pech 2016). Je nach Sichtverhältnissen ist ab einem Abstand von etwa 4 m Sichtkontakt möglich, woraufhin das eigentliche Dockingmanöver eingeleitet wird. Hierfür wird ein Satz Bildmarker, die auf den Dockingadapter gedruckt sind, verwendet. Diese Bildmarker sind derart kodiert, dass eine Identifikation jedes einzelnen Markers zweifelsfrei möglich ist. Da zu jedem Marker auch die Relativposition berechnet werden kann, ist so ein Ausrichten des Fahrzeuges sowie das eigentliche Docking möglich (Lehr 2017).

Im gedockten Zustand ist die Datenübertragung durch zwei WLAN-Module, die sich an der Docking-Station und am AUV befinden, möglich, da die beiden Antennen sehr nahe beieinander platziert sind (ansonsten wäre durch die Absorption der Sendeleistung im Wasser keine Kommunikation möglich). Abb. 4 zeigt das AUV während einer Versuchsreihe im angedockten Zustand.

Um die Navigationsfähigkeit des AUVs auf die Probe zu stellen, wurde eine Reihe von Versuchen im Bremer Unisee durchgeführt. Dort sind die Sichtbedingungen erwartungsgemäß deutlich schlechter und mehr Störfaktoren wie leichte Strömungen und Wellen treten auf. In Abb. 5 ist ein Kamerabild während des Dockingvorganges zu sehen.

Weitere Details zum IceShuttle können Wirtz (2016) entnommen werden, weitere Informationen und Ergebnisse zu dem Docking finden sich in Hildebrandt (2017).

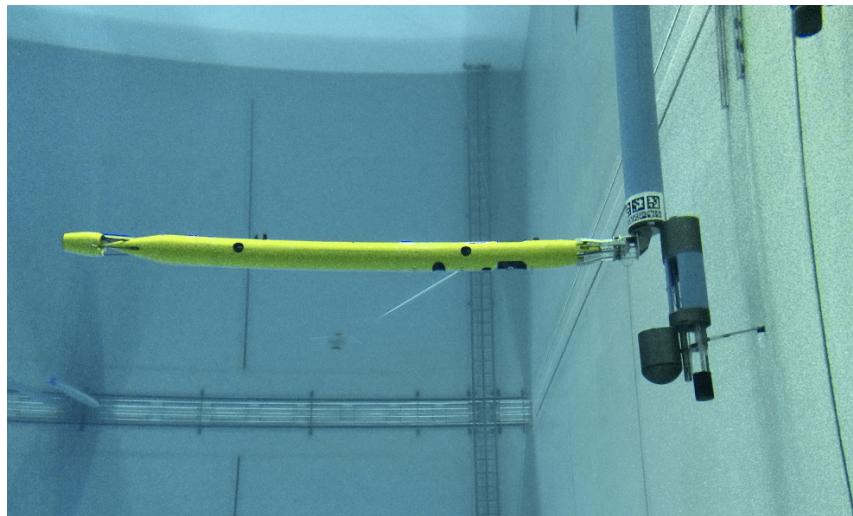


Abb. 4: Das AUV Leng angedockt am IceShuttle während einer Versuchsreihe im Maritimen Testbecken des DFKI-RIC

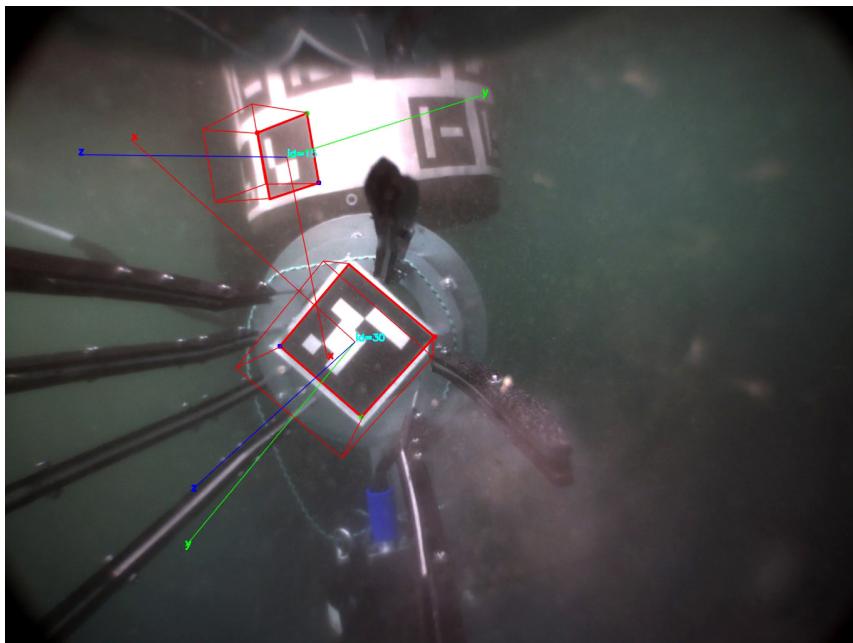


Abb. 5: Kamerabild während eines Dockingvorgangs im Bremer Unisee

4 Weiterführende Arbeiten

Das Team aus AUV Leng und IceShuttle als erstes vollfunktionsfähiges System zur Erprobung von Explorationsmissionen ist noch an vielen Stellen zu erweitern und zu verbessern, bis eine Realmission zum Jupitermond Europa möglich sein wird. Neben einer Vielzahl an Feldtests in Analogumgebungen (z. B. Arktis, subglaziale Seen) ist noch eine Reihe von Verbesserungen am System notwendig. Auch das Thema „Space-Qualification“, also Vakuum- und Strahlungsverträglichkeit, ist nicht zu unterschätzen. Während das aktuelle System nur für Flachwasseranwendungen bis 150 m Wassertiefe ausgelegt ist, wird auf dem Jupitermond ein Druck von 1100 Bar am Grund des Ozeans erwartet – dies ist zwar technisch prinzipiell machbar, bringt aber auch neue Herausforderungen mit sich. Auch Aspekte, die durch die Forderung nach einer zyklisch ablaufenden Langzeiterkundung hinzukommen, müssen betrachtet werden: Energieversorgung des IceShuttles, Biofouling, Erkennung von Beschädigungen oder Beeinträchtigungen am System. Hier gibt es noch viele offene Forschungsfragen, die in den nächsten Jahren sicherlich spannende Ergebnisse liefern werden.

Die in diesem Dokument beschriebenen Arbeiten wurden durch die Vorhaben Europa-Explorer (50NA1217) sowie EurEx:SiLana (50NA1704) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

- Hildebrandt, M.; et al. (2017): Combining Cameras, Magnetometers and Machine-Learning into a Close-Range Localization System for Docking and Homing. In: MTS/IEEE Oceans 2017 Anchorage (OCEANS-2017).
- Lehr, T. (2017): Implementierung und Evaluation einer Steuerung für die Endphase eines autonomen Dockingvorgangs. Bachelorarbeit Universität Bremen.
- Moore, J. M.; et al. (2009): Surface properties, regolith, and landscape degradation. Europa, University of Arizona Press, Tucson, 329–349.
- Pech, N. (2016): Implementierung und Evaluation eines USBL-basierten Homing-Verhaltens auf einem AUV. Bachelorarbeit Universität Bremen.
- Roth, L.; et al. (2013): Transient water vapor at Europa's south pole. *Science*, 343(6167): 171–174.
- Wirtz, M.; Hildebrandt, M. (2016): IceShuttle Teredo: An Ice-Penetrating Robotic System to Transport an Exploration AUV into the Ocean of Jupiter's Moon Europa. In: Proceedings of the 67th International Astronautical Congress, (IAC-2016).

Kontakt

Dr.-Ing. Marc Hildebrandt

DFKI-RIC Bremen

Robert-Hooke-Straße 1, 28359 Bremen

marc.hildebrandt@dfki.de

Mit unbemannten hydrographischen Erfassungssystemen, die meist ferngesteuert, zum Teil autonom oder im Verbund arbeiten, werden neue Anwendungsfelder erschlossen. Es stellt sich die Frage: Wie anwendungsreif und wirtschaftlich sind unbemannte Systeme und wie wirkt sich dies auf das Leistungsspektrum der Hydrographie aus?

Dieser Band vermittelt Grundlagen zu Datenerfassungsmethoden mit integrierten Multisensorsystemen und gibt einen aktuellen Überblick über Anwendungen im Binnenbereich sowie Projekte im Hochsee- und Küstenbereich. Der Stand der Technik und die neusten Entwicklungen werden vorgestellt.



ISBN: 978-3-95786-165-8



9 783957 861658

Schriftenreihe des DVW
Band 91 / 2018
Printversion: 31,80 Euro
PDF: kostenfrei
www.geodaezie.info

