

5/2013

Veranstaltungen

Neue Entwicklungen in der Gewässervermessung

Kolloquium
am 20./21. November 2012 in Koblenz

Koblenz, Mai 2013



Bundesministerium
für Verkehr, Bau
und Stadtentwicklung

Impressum

Herausgeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
Postfach 20 02 53
56002 Koblenz
Tel.: +49 (0)261 1306-0
Fax: +49 (0)261 1306 5302
E-Mail: posteingang@bafg.de
Internet: <http://www.bafg.de>

Druck: Druckerei Fuck, Koblenz

ISSN 1866 – 220X

DOI: 10.5675/BfG_Veranst_2013.5

URL: http://doi.bafg.de/BfG/2013/Veranst5_2013.pdf

Zitiervorschlag:

Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Neue Entwicklungen in der Gewässervermessung. Kolloquium am 20./21. November 2012 in Koblenz. – Veranstaltungen 5/2013, Koblenz, Mai 2013, 104 S.; DOI: 10.5675/BfG_Veranst_2013.5
URL: http://doi.bafg.de/BfG/2013/Veranst5_2013.pdf

Inhaltsverzeichnis

Einführung	4
Ist die Gewässervermessung der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung für zukünftige Anforderungen gerüstet?	
Thomas Rosenstein.....	5
Neue Entwicklungen in der Gewässervermessung	
Harry Wirth.....	10
Qualitätsmanagement in der Gewässervermessung – die Arbeit der QM-Beauftragten der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung	
Hannes Lutter.....	15
Messunsicherheiten in der Gewässervermessung, Grundlagen und Beispiele für Anwendungsmöglichkeiten	
Harry Wirth.....	22
Ingenieurgeodätische Fragestellungen bei der Einmessung von Vermessungsschiffen	
Thomas Brüggemann.....	32
Forschung und Entwicklung zum schiffserzeugten Sedimenttransport (SeST) im NOK und in der Elbe	
Bernhard Kondziella, Volker Böder†, Andreas Prokoph und Arne Sauer.....	41
Die Entwicklung der hydrographischen Auswertesoftware (PAUSS) für die WSV	
Erich Rader	50
Kombination von Hydrographie und terrestrischen Laserscannern – systematische Effekte, Kalibrier- und Auswertemethoden	
Friedrich Keller und Harald Sternberg	61
Objektvermessung mit kombinierten hydrographischen Vermessungssystemen – Erfahrungen mit mobilen Laserscannern im Hamburger Hafen	
Thomas Thies.....	73
Integrierte GNSS-INS-Navigationssysteme – Stand der Technik und Entwicklungskonzept	
Monika Hentschinski	81
Entwicklung von Verfahren zur Verbesserung der Ortung mit Global Navigation Satellite Systems (GNSS)	
Annette Scheider und Volker Schwieger.....	89
Detektion von Sedimentschichten an Bundeswasserstraßen	
Jens Wunderlich, Sabine Müller und Peter Hümbts	98

Einführung

In vielen Bereichen der Wasserstraßen der Bundesrepublik Deutschland wird die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Ortung mit Global Navigation Satellite Systems (GNSS) durch Signalabschattungen beeinträchtigt. Die Kopplung von inertialen Sensoren mit GNSS bzw. integrierte Systeme mit redundanten Sensoren sind ein vielversprechender Ansatz. Das gegenwärtige Leistungsvermögen marktgängiger integrierter Ortungssysteme sowie Entwicklungsansätze zur Problemlösung werden gezeigt.

Im Produktbereich Gewässervermessung erhalten die Kunden Qualitätsangaben zum fertigen Produkt, wie z. B. den Karten. Ein oftmals entscheidender Aspekt für die Nutzbarkeit ist die Genauigkeit der Messergebnisse. Deshalb muss vom Produzenten für jeden Messwert und jedes Produkt die anhaftende Unsicherheit berechnet werden. Im Kolloquium werden Ansätze für die Produzenten vorgestellt, die leicht erlernbar und für die Nutzer von Produkten leicht verständlich sind.

Die Kenntnis der Zusammensetzung der Sohldeckschicht oder des Aufbaus der oberflächennahen Schichten ist eine wichtige Information, die mit hydroakustischen Methoden gewonnen werden kann. Diese Information ist eine Grundlage für Ausbau und Unterhaltung der Wasserstraßen und ermöglicht die Beurteilung der Freisetzung verschiedener Stoffe und Stoffgruppen sowie deren Auswirkungen auf die Umwelt. Der derzeitige Stand der Technik und das Potenzial der Hydroakustik werden anhand von Beispielen aufgezeigt.

Das Kolloquium richtet sich an alle Hydrographen sowie an alle Nutzer von Produkten der Gewässervermessung.

Die Vorträge des Kolloquiums finden Sie auf den Internetseiten der BfG unter www.bafg.de (Wissen → Veranstaltungen → Rückblick 2012) bzw. unter dem Link: http://www.bafg.de/DE/05_Wissen/02_Veranst/2012/2012_11_20.html

Ist die Gewässervermessung der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung für zukünftige Anforderungen gerüstet?

Thomas Rosenstein

1 Herausforderungen der Zukunft

Schon Ernest Hemmingway stellte fest, dass „das Merkwürdige an der Zukunft wohl die Vorstellung ist, dass man unsere Zeit einmal die gute alte Zeit nennen wird“. So hätte wahrscheinlich vor 50 Jahren niemand davon geträumt, dass es einmal eine Fächerecholottechnik geben wird, mit der die Gewässersohle flächenhaft mit hoher Informationsdichte und Qualität aufgenommen werden kann. Insofern kann ein Blick nach vorne natürlich nur unter dem Wissensstand von heute gerichtet werden.

Betrachtet man allerdings die Entwicklung des Systems Wasserstraße, fällt es nicht schwer, zu erahnen, welcher Herausforderung sich die Gewässervermessung der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) zukünftig stellen muss.

Als eine der führenden Wirtschafts- und Exportnationen ist Deutschland besonders abhängig von einer verlässlichen Infrastruktur für den Binnen- und Außenhandel. Die See- und Binnenschifffahrtsstraßen stellen diesbezüglich einen wesentlichen Beitrag dar, indem Sie den überkontinentalen Anschluss an den Welthandel sowie die Anbindung der bedeutenden Industriestandorte im Binnenbereich an die Seehäfen gewährleisten. Die deutschen Binnenwasserstraßen sind sowohl auf der West-Ost- als auch der Nord-Süd-Achse wesentliches Rückgrad des gesamteuropäischen Wasserstraßennetzes. Neben der Bedeutung als Verkehrsweg haben Wasserstraßen aber auch eine immer häufiger wahrgenommene Mehrfachfunktion mit gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Bedeutung (Ökologie, Tourismus, Wasserwirtschaft) und stehen damit im Fokus von Politik und Öffentlichkeit.

Um die Zuverlässigkeit und Sicherheit des Verkehrsweges zu gewährleisten, werden der Schifffahrt seit jeher verlässliche Tiefen innerhalb einer definierten Fahrrinne sowie verlässliche Breiten eines Fahrwassers zur Verfügung gestellt. Hierbei werden die Anforderungen an die Aktualität und Genauigkeit jedoch weiter steigen, da der globale und verkehrsübergreifende Wettbewerb immer größere Schiffseinheiten hervorruft, um die Transportkosten gering zu halten. So wächst das Durchschnittsschiff z. B. auf dem Rhein jährlich um 1-1,5 % in seinen Abmaßen. Auch in der Seeschifffahrt nimmt die Anzahl großer Containerschiffe stetig zu. Dies führt zu einer zunehmenden Empfindlichkeit der zur Verfügung stehenden Wassertiefen, da immer mehr Schiffe tide- bzw. wasserstandsabhängig beladen sind.

Neben den bekannten aber auch begrenzten Erwartungen an den Ausbau der Wasserstraßen rückt damit das Bestreben, auch die letzten Zentimeter der Wasserstraße in Breite und Tiefe nutzen zu dürfen und nutzen zu können, immer mehr in den Fokus. Diese Bestreben wird durch die bekannten Niedrigwasserperioden und die Diskussionen um den Klimawandel verstärkt.

Neben den Wasserstraßenverhältnissen ist aber auch eine störungsfreie Fahrt immer wichtiger für eine konkurrenzfähige, moderne Logistikplanung. Vermehrt setzen Unternehmen auf eine Lagerhaltung auf Schiffen, um Kosten zu sparen. Dies hat zur Konsequenz, dass die Unternehmen auf „just-in-time“ Verkehre angewiesen sind, um produktionsfähig zu bleiben. Verspätung durch Sperrzeiten und Engpässe führen mitunter zu hohen wirtschaftlichen Ausfällen bis hin zum Produktionsstillstand.

Das zunehmende Alter unserer Wasserbauwerke erfordert zusätzlich vermehrt Inspektionsmessungen, um einen sicheren Zustand und Betrieb zu gewährleisten und unvorhergesehene Sperrungen zu vermeiden.

Neben den gesetzlichen und wirtschaftlichen Verpflichtungen ist auch der gesellschaftliche Anspruch an Überzeugungs- und Informationsdargebot steigend. Um die Aufgaben für Betrieb, Unterhaltung und Ausbau von Wasserstraßen unter dem Blickwinkel der Mehrfachinteressen erfüllen zu können, werden immer höhere Anforderungen an Nachweise und Gutachten gestellt, deren Grundlage nur präzise digitale Geländemodelle stellen können. Die Durchsetzbarkeit von Projekten ist in der heutigen Gesellschaft komplex und ohne eine solche fundierte Grundlage nicht möglich.

2 Anforderungen an die Gewässervermessung

Alle genannten Herausforderungen benötigen eine qualitativ hochwertige Gewässervermessung. Sie ist die Grundlage aller Bestrebungen zur Erhaltung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs und der Wahrnehmung baupolizeilicher Verantwortung für die Anlagen an und in Wasserstraßen. Eine hohe Informationsdichte ist sowohl für die Verkehrssicherung der Wasserwege als auch der Bauwerksinspektion und Planung unabdingbar, um den genannten Anforderungen gerecht zu werden.

Nicht zuletzt muss die Gewässervermessung bei Havarien oder Hindernissuche schnelle und genaue Erkenntnisse liefern, um Störungen im System und damit wirtschaftlichen Schaden, soweit es geht, zu minimieren. Zudem müssen die Endprodukte der Gewässervermessung der Schifffahrt und den Logistikunternehmen aktuelle Informationen liefern, um eine möglichst wirtschaftliche Abladung und planbare Fahrtzeit abschätzen zu können.

Um für die Zukunft gerüstet zu sein, muss die Gewässervermessung daher den weiter steigende Anforderungen an die Aktualität, Genauigkeit und Vollständigkeit der Ergebnisse gewachsen sein. Diesem Anspruch stehen begrenzte Personalressourcen und Haushaltsmittel entgegen. Aus diesem Grund mussten und müssen Wege und Lösungen gesucht werden, den Anforderungen bei stetigen Personalabbau gerecht zu werden, um eine möglichst optimale Aufgabenerledigung zu gewährleisten.

Die im Jahr 2009 erstellten Fachkonzepte Gewässervermessung der Binnendirektionen, die zurzeit in Arbeit befindlichen Konzepte der Gewässervermessung für Nord- und Ostsee sowie die Einführung der Qualitätsstandards für die Gewässervermessung (aQua) bilden dabei eine wesentliche Grundlage, diesen Anforderungen und Rahmenbedingungen gerecht zu werden.

3 Effizienz durch innovative Peil- und Schiffstechnik

Durch die im Rahmen der Erarbeitung der Fachkonzepte Gewässervermessung der Binnendirektionen durchgeführten Untersuchungen konnten für die Binnenwasserstraßen Standards für eine optimierte Aufgabenerledigung gefunden werden, die es voraussichtlich ermöglichen, die Effizienz der Peilleistung auf den relativ flachen Binnenwasserstraßen erheblich zu steigern, mithin auch zu verdoppeln.

Die Entscheidung, das im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsdirektion (WSD) Mitte eingesetzte Katamaransystem mit einer weltweit erstmalig verwendeten Triple-Head-Technik (Fächerecholot mit drei Schwingerköpfen) als Standard zu definieren, ermöglicht zukünftig eine optimale Kursstabilität und eine wesentlich breitere Peilstreifenaufnahme. Neben der technischen Optimierung beinhaltet der Lösungsansatz auch systembedingte, organisatorische Änderungen wie die Mehrzweckpeilung und eine Einsatzzeitoptimierung. Beides wurde in den Konzepten zur Gewässervermessung manifestiert. Sofern die erforderlichen Beschaffungen abgeschlossen sind, stehen qualitativ hochwertige Erfassungseinheiten mit geringerem Einsatz- und Gerätebedarf zur Verfügung. Darüber hinaus erhalten die Außenbezirke die notwendige Ausrüstung, um ereignisbezogen schnell handlungsfähig zu sein.

Aber nicht nur auf Binnenwasserstraßen, sondern auch an der Küste werden effiziente und kostenreduzierende Maßnahmen gesucht und umgesetzt. Zusätzlich zu modernen Peileinheiten werden vor allem in Watt- und Flachwasserbereichen vermehrt Befliegungen zur Vermessung der tidebedingt trockenfallenden Gewässersohle eingesetzt.

Zudem werden Peilleistungen mit fiskalischer Bedeutung (Aufmaße, Modellierungen) vermehrt an Dritte vergeben, um damit die eigenen Ressourcen für die hoheitlichen Aufgaben frei zu halten.

Neben den genannten Aspekten werden Innovationen verfolgt, um den Aufwand weiter zu reduzieren bzw. die Ergebnisqualität zu steigern. Hierzu zählt zum Beispiel auch, ein Ersatzsystem für die Polarortung zu finden, das in GPS-abgeschirmten Bereichen zu Positionsbestimmung eingesetzt werden kann. Ich freue mich, dass im Rahmen dieses Kolloquiums über die diesbezüglich laufenden Aktivitäten berichtet wird.

4 Qualitätsstandards

Um die Aufgabenerledigung zu optimieren, sind technische Maßnahmen allein nicht ausreichend. Neben der technischen Standardisierung bedarf es auch organisatorischer Veränderungen, um die Kräfte zu bündeln, das Fachwissen zu stärken und die Qualität zu sichern. Mit der Entwicklung und Umsetzung von „aQua“ (Angewandtes Qualitätsmanagement in der Gewässervermessung) ist die WSV auf ein optimales und kundenorientiertes Qualitätssystem für die Gewässervermessung bereits bestens vorbereitet.

Das an der Küste bereits schon auf einem hohen Level integrierte System befindet sich für den Binnenbereich im Aufbau. Die Standards tragen dazu bei, dass durch Rollenzuteilung die Aufgabenzuordnung geordnet und gebündelt wird, um insgesamt die Qualität der Messergebnisse zu verbessern.

Auch das neue Peildatenauswertesystem (PAUSS) wird zukünftig einheitliche, kundenorientierte und effektive Ergebnisse hervorbringen und die Qualität der Gewässervermessung insgesamt steigern.

Ein künftiger Schwerpunkt wird sein, die erforderliche Qualifikation aller Mitwirkenden in der Gewässervermessung zu erhalten bzw. durch geeignete Aus- und Fortbildungsmaßnahmen zu optimieren.

5 Fazit

Das System Wasserstraße steht für eine im verkehrsübergreifenden Vergleich umweltschonende und für die Wirtschaftskraft unverzichtbare Infrastruktur. Um die Wirtschaftskraft zu erhalten, muss daher auch die Gewässervermessung der WSV für zukünftige Anforderungen gerüstet sein.

Um dies zu gewährleisten, wurden viele Maßnahmen ergriffen, die zum Teil noch umgesetzt werden müssen.

Im Januar geht das erste neue Standardpeilschiff am Rhein in Betrieb, in der WSD Süd ist das neue Peilsystem bereits im Wirkbetrieb. Damit sind wesentliche Meilensteine erreicht. Das an der Küste bereits etablierte Qualitätsmanagementsystem „aQua“ muss im Binnenbereich noch etabliert werden. Weitere Beschaffungen sind abzuschließen.

Technische und organisatorische Optimierungen im Zusammenhang mit der Ablösung der Polarortung, der Auswertesoftware, aber auch hinsichtlich der Fortbildung und Qualifikation des Personals müssen konsequent verfolgt werden.

Ich bin allerdings überzeugt, dass durch die hohe Kompetenz des Referates *Geodäsie* bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde und den Kollegen in der WSV diese Prozesse gemeistert und weitere Innovation gefördert wird.

Mit diesem Ziel vor Augen ist die WSV für die Anforderungen der Zukunft gut gerüstet. Die folgenden Vorträge werden dies eindrucksvoll belegen.



Kontakt:

Thomas Rosenstein

Referat WS11

Bundesministerium für Verkehr,
Bau und Stadtentwicklung

Robert-Schuman-Platz 1

53175 Bonn

Tel.: 0228/ 300 4712

E-Mail:

thomas.rosenstein@bmvbs.bund.de

1994-2000

Studium Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen

2000-2002

Referendariat bei der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

2002-2006

Wasserstraßen-Neubauamt Datteln

Projektleiter (2002)

Sachbereichsleiter für Streckenausbau (2003-2006)

seit 2006

Bundesministerium für Verkehr, Bau und
Stadtentwicklung

Wasserstraßenmanagement Binnen und Küste

Gebietsreferent Rhein-Mosel-Saar-Lahn (2006-2010)

Gebietsreferent Seehafenzufahrten Weser, Ems, Jade
(seit 2010) und Main-Donau-Kanal (seit 2011)

Referent für die Aufgabenerledigung im Peilwesen
(seit 2006)

Referent für die Automatisierung und Fernbedienung
von Schleusen und Anlagen (seit 2008)

Neue Entwicklungen in der Gewässervermessung

Harry Wirth

1 Einleitung

Mit dem in der Gewässervermessung eingeführten Qualitätsmanagementsystem aQua verpflichtet sich die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), durch Aus- und Fortbildungsmaßnahmen die erforderliche Kompetenz der beteiligten Mitarbeiter/Mitarbeiterinnen den Aufgaben entsprechend zu gewährleisten. Dieser Sachverhalt ist nach außen sichtbar im Qualitätsmanagement-Handbuch dokumentiert.

Der negativ eingestellte Kritiker könnte nun fragen, „Warum brauchen wir neue Entwicklungen in der Gewässervermessung?“ oder eher positiv konstruktiv „Welche Informationsmöglichkeiten bestehen für den an der Gewässervermessung interessierten oder dort tätigen Menschen?“

2 Qualifikation und Aus- und Fortbildung in der Gewässervermessung

Die für die Gewässervermessung erforderlichen ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen sollten grundsätzlich durch ein Studium der Hydrographie erworben werden. In Deutschland ist dies nur an der HafenCity Universität Hamburg möglich. Der Ausbildungsabschluss wurde nach der international anerkannten Kategorie A nach IHO-Standard S5 zertifiziert.

Eine Behörde oder ein Ingenieurbüro muss sich damit auseinandersetzen, die Weiterqualifikation des Personals zu organisieren und zu standardisieren. Die Vereinigung TECHAWI bietet beispielsweise Kurse mit dem Abschluss IHO-Kategorie B an (Grundverständnis maritimer Hydrographie und die Fähigkeit, Messungen durchzuführen).

Die Besuche von der Hydrographentage sowie der internationalen Veranstaltung *Hydro* werden oft vom Interessenten mehr oder weniger privat organisiert und finanziert. Jede Dienststelle bzw. jedes Ingenieurbüro entscheidet für sich, ob die Teilnahme im dienstlichen Interesse ist. Diese Praxis wird der Bedeutung der Gewässervermessung für die WSV nicht gerecht.

Die Weiterbildung ist eine wesentliche Voraussetzung, um die Anforderungen in der Gewässervermessung auch zukünftig erfüllen zu können.

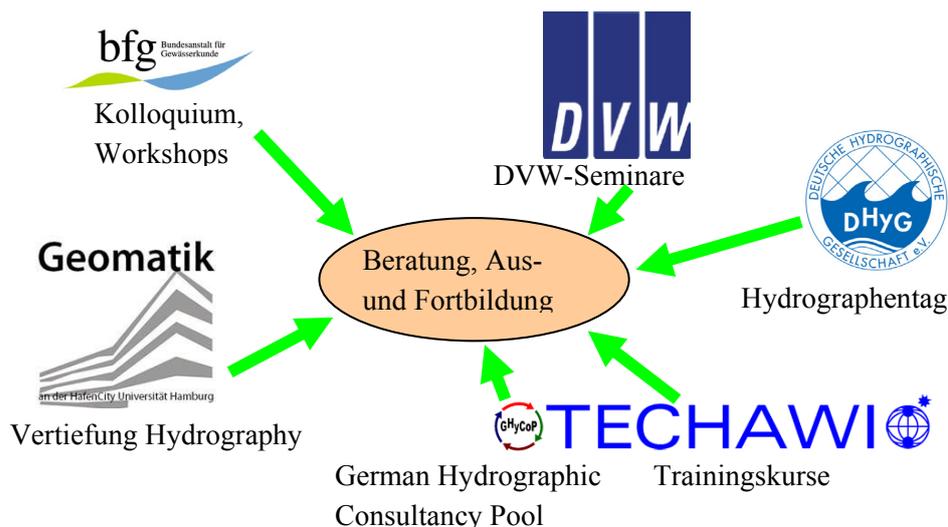


Abb. 1: Darstellung der Informationslandschaft für die Gewässervermessung

In Deutschland gibt es mehrere Institutionen, die Informationen über aktuelle Entwicklungen bereitstellen. Die meisten Institutionen unterhalten Beziehungen zur Deutschen Hydrographischen Gesellschaft (DHYG). Diese ist wiederum in der International Federation of Hydrographic Societies (IFHS) vernetzt. Unter dieser Bezeichnung haben sich einige der weltweit in der Hydrographie bedeutendsten Gesellschaften zusammengeschlossen, beispielsweise Großbritannien, Benelux, Dänemark, Italien und Australien.

Warum sollten wir uns Gedanken über neue Entwicklungen in der Gewässervermessung machen?

2.1 Leistungsbereiche der Gewässervermessung

Auf der Homepage der Australasian Hydrographic Society (www.ahs.asn.au) findet man eine Auflistung der Aufgaben, die die Bedeutung der Gewässervermessung mit Blickrichtung aus dem maritimen Bereich unterstreichen. Dieser Blick von außen auf die Bedeutung der deutschen Gewässer hilft, die gestellte Frage zu beantworten.

- Fakt 1: Auf dem Seeweg werden mehr als 95 % des interkontinentalen Warenverkehrs abgewickelt. Dazu gibt es keine technische Alternative oder Ausweichmöglichkeit. Ohne Gewässervermessung gäbe es keine sichere Navigation in der Schifffahrt.
- Fakt 2: Die Häfen bilden die Schnittstelle zwischen Seeweg und den Bundeswasserstraßen. Ohne Gewässervermessung könnten keine Häfen existieren. Die Warenströme kämen zum Erliegen. Auf den Bundeswasserstraßen werden fast 75 % der Güterverkehrsleistung der Eisenbahnen transportiert.
- Fakt 3: Deutschland hält derzeit einen Anteil von ca. 25 % an der Energieversorgung durch nachhaltige erneuerbare Energien. Der Großteil der Energiewende basiert derzeit auf Windkraftanlagen.

Ohne Gewässervermessung ist dies nicht leistbar. Die Ziele der sogenannten „Energiewende“, nämlich 80 % der Energieversorgung aus erneuerbaren Energiequellen bis zum Jahr 2050 zu speisen, würden nicht erreicht.

Ohne Gewässervermessung wird im Gewässer keine Pipeline verlegt oder unterhalten.

Ohne Gewässervermessung wäre die Energiegewinnung mit Wasserkraft im Binnenbereich nicht möglich.

Fakt 4: Auch für ökologische Fragestellungen werden verstärkt Informationen über die Geometrie und Beschaffenheit der Gewässersohle benötigt. Beispielsweise bei dem Programm zur Verbesserung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen für Wanderfische. Hier ist es von Interesse, die Struktur im Bereich der Schiffstreppen sehr detailliert zu kennen.

Ohne Gewässervermessung sind Umweltverträglichkeitsuntersuchungen für Maßnahmen an den Gewässern nur eingeschränkt möglich.

Fakt 5: Ohne Gewässervermessung gäbe es sehr viel mehr Havarien. Die negativen Folgen von Havarien wären noch größer. Allein auf der Gebirgsstrecke des Rheins zwischen Bingen und der Loreley kommt es im Jahr zu rund 120 Unfällen – darunter 20 mit erheblichen Folgen.

2.2 Bedarfsabfrage für zukünftige Kolloquien

Die Teilnehmer des Kolloquiums hatten Gelegenheit, sich mit Hilfe eines Fragebogens zur Häufigkeit und möglichen inhaltlichen Schwerpunkten zukünftiger Kolloquien zu äußern.

Die statistische Auswertung hatte folgendes Ergebnis:

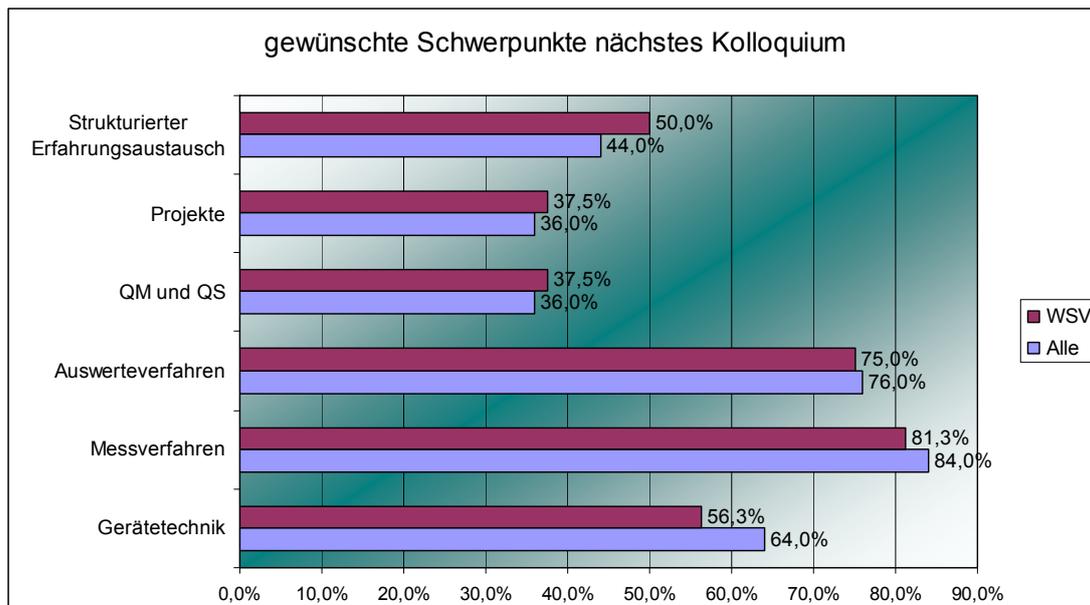


Abb. 2: Umfrageergebnisse

An der Umfrage haben sich 25 Personen beteiligt, davon waren 16 in der WSV und 9 in der Industrie, anderen Behörden oder Hochschulen beschäftigt. Das Publikum wünscht mehrheitlich eine Ausrichtung auf vorwiegend technische Inhalte, wobei die Mess- und Auswerteverfahren mit deutlichem Abstand gegenüber der Gerätetechnik bevorzugt werden. Die Frage, „Wie oft sollte ein Kolloquium durchgeführt werden?“, wurde im Mittel mit 2,4 Jahren und einer Standardabweichung von 1,2 Jahren beantwortet. Es sind demnach 68 % der Meinung, dass zwischen zwei Kolloquien ein zeitlicher Abstand von 1,2 bis 3,6 Jahren liegen sollte.

Die Statistik zeigt auch, dass sich durch Hinzunahme von Nicht-WSV-Angehörigen in diesen Aussagen keine signifikanten Veränderungen ergeben.

Die größten Veränderungen sind in der Einschätzung der Bedeutung der Gerätetechnik sichtbar. Eine mögliche Ursache könnte sein, dass Nicht-WSV-Angehörige den benutzten Geräten eine größere Bedeutung beimessen, als der Art und Weise der Anwendung.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Anforderungen der Kunden müssen auch in Zukunft erfüllt werden. Daher ist eine kontinuierliche Verbesserung der Dienstleistungen der Gewässervermessung erforderlich. Die Verbesserungen können zielgerichteter erfolgen, wenn der Verbesserungsbedarf regelmäßig, z. B. nach Vorgabe durch ein Qualitätsmanagementsystem, systematisch hinterfragt wird.

Es ist leicht, die Bedeutung des Gesagten frei nach Erich Kästner zusammenzufassen:

- > Neue Entwicklungen in der Gewässervermessung ist wie Schwimmen gegen den Strom.
- > Stillstand in der Gewässervermessung wäre ein Rückschritt mit negativen Folgen für weite Bereiche der Gesellschaft.

Literatur

IHO S5: STANDARDS OF COMPETENCE for Hydrographic Surveyors Publication S-5
Eleventh Edition Version 11.0.1 – May 2011 Guidance and Syllabus for Educational
and Training Programmes



Kontakt:

Harry Wirth

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/ 1305 5232
Fax: 0261/ 1306 5088
E-Mail: wirth@bafg.de

Jahrgang: 1959

1980-1986

Studium Geodäsie an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

1986-1988

Referendariat in Nordrhein-Westfalen

seit 1988

wissenschaftlicher Mitarbeiter und Ansprechpartner für Gewässer- und Objektvermessung in der Bundesanstalt für Gewässerkunde

seit 2010

Stellvertreter des Referatsleiters Geodäsie in der BfG

Aufgabenschwerpunkte:

Entwicklung und Erprobung von Mess- und Auswertesystemen (z.B. GNSS, Triple head-Fächerlot, Auswertemethoden für Massendaten)

Beratung und Unterstützung der WSV bei der Umsetzung neuer Techniken

Qualitätsmanagement in der Gewässervermessung – die Arbeit der QM-Beauftragten der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung

Hannes Lutter

1 Einleitung

Ziel dieses Artikels soll es sein, eine Einordnung des Themas in den Bereich der Managementsysteme zu geben, die Rollen und Verantwortungen in einem Qualitätsmanagementsystem zu benennen, den Begriff des Qualitätsmanagement-Beauftragten zu beleuchten, und die praktische Arbeit des Qualitätsmanagement-Beauftragten der Gewässervermessung in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) vorzustellen.

1.1 Managementsysteme

Managementsysteme sind Instrumente der Unternehmensführung und dienen der langfristigen Sicherung der Unternehmensziele. Unternehmensziele werden als eine Art Leitfaden oder Vision definiert. Die Umsetzung dieser Ziele in die Realität wird durch die aufeinander abgestimmte Gesamtheit der Funktionen der Führungskräfte wie Planen, Entscheiden, Organisieren, Kontrollieren und Führen sichergestellt. In der Praxis ist eine Vielzahl von Managementsystemen anzutreffen, so zum Beispiel:

- > Umweltmanagementsystem
- > Personalmanagementsystem
- > Ressourcenmanagementsystem
- > Finanzmanagementsystem
- > Zeitmanagementsystem
- > Gesundheitsmanagementsystem
- > Hygienemanagementsystem
- > Risikomanagementsystem
- > Qualitätsmanagementsystem

Nicht selten werden diese heute simultan verwendet, so dass diese kombinierten Systeme als integrierte Managementsysteme bezeichnet werden können.

Trotz der verschiedenen thematischen Ausrichtungen haben die vorgenannten Managementsysteme einige wesentliche Gemeinsamkeiten:

- > Definition einer Politik
- > Klärung der Verantwortlichkeiten
- > Steuerung der Ressourcen
- > Identifikation von Fehlern und Ermittlung der Ursachen
- > Reklamations- und Beschwerdebearbeitung
- > Regelmäßige Durchführung von Inspektionen, Audits, Prüfungen
- > Nutzung des Regelkreises zur kontinuierlichen Verbesserung des Systems

1.2 Qualitätsmanagementsysteme (QMS)

Bei einem Qualitätsmanagementsystem handelt es sich um ein Managementtool, mit dem die Leitung sicherstellt, dass die von ihr festgelegte Qualitätspolitik durch konkrete Zielsetzungen erreicht wird. Hier liegt der Fokus auf den Produktionsprozessen und deren Qualitätssicherung. Die Qualitätssicherung umfasst alle Maßnahmen, die garantieren, dass die Forderungen des Kunden an ein Produkt dauerhaft, kontinuierlich und vollständig erfüllt werden.

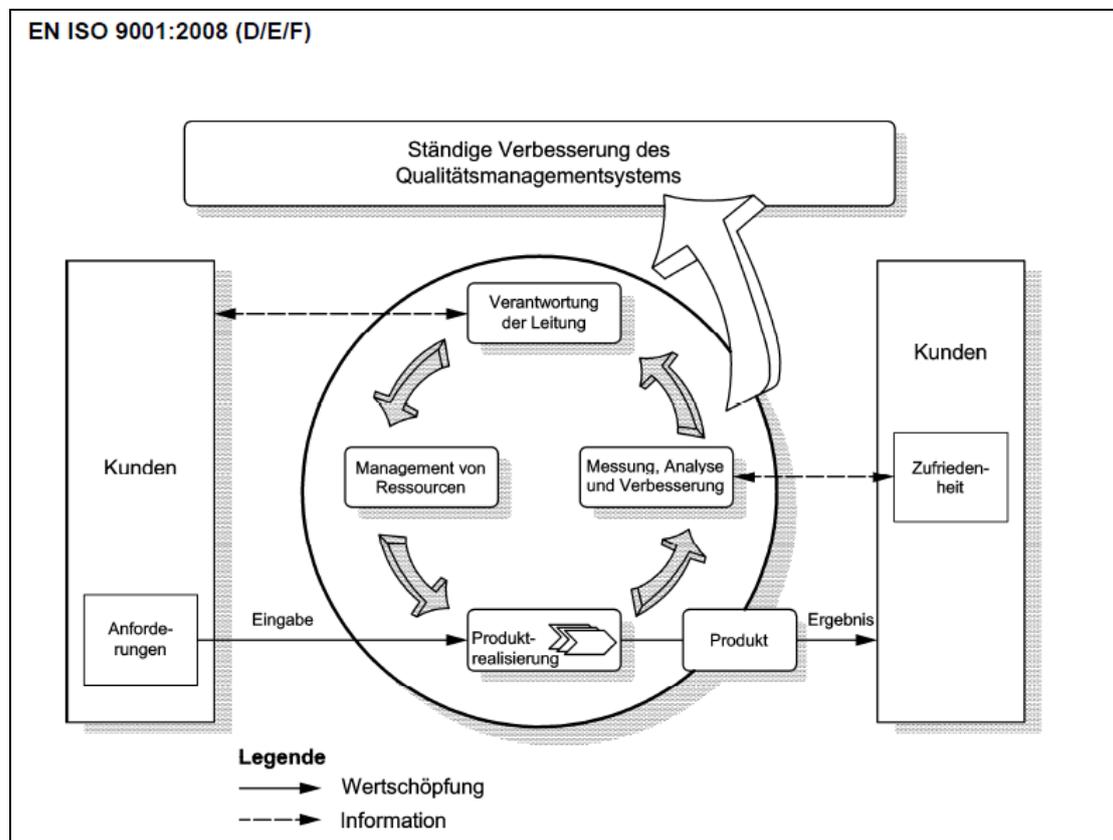


Abb. 1: Darstellung des QM-Regelkreises

QMS bilden daher immer die Prozesse der Wertschöpfung ab, beginnend mit der Auftragsannahme, der standardisierten Produktion und endend mit der Produktabgabe an den Kunden. Zur Aufrechterhaltung eines kontinuierlich lernenden und sich „selbst“ verbessernden Systems ist der Wertschöpfungskette der Demingkreis (kontinuierlicher Verbesserungsprozess) überlagert.

1.3 QM-Beteiligte

Um ein Qualitätsmanagementsystem dauerhaft mit Leben füllen zu können, sind verschiedene Rollen verknüpft mit Verantwortlichkeiten zu besetzen.

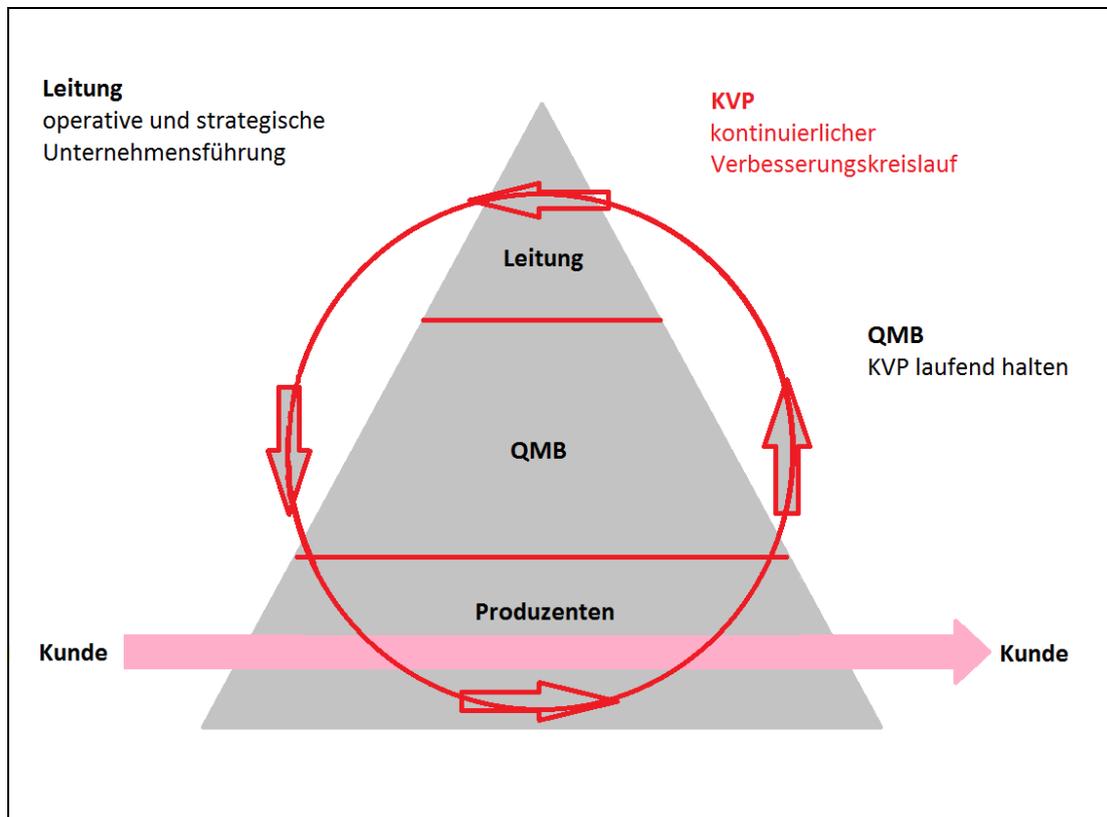


Abb. 2: Darstellung der QM-Beteiligten

Für die Wertschöpfung und die Erfüllung der Kundenforderungen sind die beteiligten Produzenten verantwortlich.

Die Leitung des Unternehmens oder der Verwaltung ist für die operative und strategische Unternehmensführung zuständig. Mit dem Wunsch nach der Implementierung und Laufendhaltung eines QMS geht die Leitung nach der ISO Norm automatisch Verpflichtungen ein.

Die oberste Leitung weist ihre Selbstverpflichtung nach, in dem sie:

- > die Qualitätspolitik festlegt,
- > sicherstellt, dass Qualitätsziele festgelegt werden,
- > sicherstellt, dass Managementbewertungen durchgeführt werden,
- > sicherstellt, dass der Organisation die Erfüllung der Kundenanforderungen vermittelt werden
- > und die Verfügbarkeit von Ressourcen sichergestellt ist.

In der Summe ist die Leitung rahmengebend für das gesamte QMS tätig.

Die dritte nach der Norm zu besetzende zentrale Rolle ist mit einem Beauftragten der obersten Leitung zu besetzen.

„Die oberste Leitung muss ein Mitglied der Organisation benennen, das, unabhängig von anderen Verantwortungen, die Verantwortung und Befugnis hat, die Folgendes einschließen:

- a) sicherstellen, dass die für das Qualitätsmanagementsystem erforderlichen Prozesse eingeführt, verwirklicht und aufrechterhalten werden;
- b) der obersten Leitung über die Leistung des Qualitätsmanagementsystems und jegliche Notwendigkeit für Verbesserungen zu berichten; und
- c) die Förderung des Bewusstseins über die Kundenanforderungen in der gesamten Organisation sicherzustellen.“ (ISO 9001:2008, Abschnitt 5.5.2)

2 Der Qualitätsmanagement-Beauftragte (QMB)

Der Beauftragte der obersten Leitung wird auch als Qualitätsmanagement-Beauftragter (QMB) bezeichnet. Dieser hat die Aufgaben:

- > das QMS im Unternehmen nachhaltig zu implementieren, aufrechtzuerhalten und den kontinuierlichen Verbesserungsprozess zu unterstützen und immer wieder anzuregen,
- > die Kommunikation mit Kunden und anderen Interessierten zu unterstützen,
- > bei der Planung der Qualitätspolitik die Leitung zu unterstützen,
- > bei der Umsetzung der Qualitätsziele mitzuwirken.

QMB lenken proaktiv und vorausschauend den QM-Prozess in Unternehmen und Organisationen. Sie tragen als Verantwortliche der obersten Leitung Sorge dafür, dass die Normforderungen umgesetzt werden.

3 Der QMB der Gewässervermessung in der WSV

Für den Aufgabenbereich der Gewässervermessung in der WSV ist seit mehreren Jahren ein internes Qualitätsmanagementsystem entwickelt und eingeführt worden. Dieses wird unter dem Namen aQua geführt. Die Aufgaben des QMB innerhalb von aQua werden durch die WSV-weite Geschäftsstelle wahrgenommen.

3.1 Geschäftsstelle aQua

Laut Geschäftsordnung der Geschäftsstelle aQua setzt sich diese paritätisch aus Mitgliedern des Binnen- und Küstenbereichs zusammen. Die beiden Bereiche werden jeweils durch zwei Produzenten und je einen WSD-Mitarbeiter repräsentiert.

Die Geschäftsstelle aQua ist:

- > Ansprechpartner für das QMS aQua insgesamt und
- > zuständig für die Aufrechterhaltung von aQua.

Darüber hinaus ist sie verantwortlich für:

- > den Erhalt einheitlicher Mindeststandards in der Gewässervermessung der WSV,
- > die Planung, Durchführung und Auswertung von Audits,

- > die Pflege und Aktualisierung der aQua-Dokumente,
- > die Annahme und Auswertung von Reklamationen,
- > die Fertigung und Vorlage eines jährlichen Geschäftsberichts,
- > die Durchführung eines jährlichen Managementreviews mit der obersten Leitung,
- > die Planung und ggf. Durchführung von Schulungen.

3.2 Das aQua-Jahr des QMB

Um die Vielzahl an Tätigkeiten strukturiert und kontinuierlich innerhalb eines Jahres abarbeiten zu können, wird zum Jahresbeginn eine Jahresplanung von der Geschäftsstelle aufgestellt. Neben außerplanmäßigen Aufgaben werden die jährlich wiederkehrenden Tätigkeiten erfasst und priorisiert.

Zu Beginn eines Jahres werden neben der o. g. Jahresplanung die Ergebnisse der lokal durchgeführten Managementreviews abgefragt und ausgewertet.

Im ersten Quartal erfolgen die Auditjahresplanung und die Auditvorbereitungen. Als Vorbereitung auf das im ersten Quartal stattfindende Managementreview mit der obersten Leitung wird ein Jahresbericht zum zurückliegenden aQua-Jahr gefertigt und der obersten Leitung zur Verfügung gestellt.

Im dritten Quartal erfolgt die Durchführung der Audits in den an aQua teilnehmenden Wasser- und Schifffahrtsämtern.

Im laufenden Jahr werden Schulungen zum QM allgemein und dem QMS aQua durchgeführt, die aQua-Dokumente angepasst sowie fortgeschrieben. Die Geschäftsstelle aQua steht darüber hinaus allen Interessierten als Ansprechpartner zur Verfügung.

3.3 Resultate aus dem aQua-Jahr 2012

Im vergangenen Jahr sind zahlreiche neue Arbeitsanweisungen sowie die dazugehörigen Dokumente und Protokolle neu entwickelt worden, Diese sind im Intranet der WSV zum Download verfügbar. Einige wesentliche Themenbereiche sollen nachfolgend genannt werden.

- > Abnahme von Vermessungssystemen
- > Datenübernahme Dritter (aus Vergaben, ...)
- > Anpassung des QM-Handbuches
- > Regelungen zur Weitergabe von aQua-Dokumenten an Externe

Diese Ergebnisse fanden Berücksichtigung in der aktuellen aQua-Version 5.0, welche noch Ende 2012 veröffentlicht werden konnte.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In einem QMS sind verschiedene Verantwortlichkeiten vergeben. Die Produzenten garantieren Produkte entsprechend der Nutzeranforderungen. Die Leitung arbeitet strategisch und rahmengebend durch Ressourcenbereitstellung und Vorgabe der Qualitätspolitik sowie konkrete Qualitätsziele. Der von der Leitung eingesetzte QMB sorgt für den Fortbestand eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses und ist der zentrale Ansprechpartner für das QMS.

Die strategischen Ziele der Leitung wie:

- > Aufrechterhaltung des QMS aQua im Küstenbereich,
- > pilothafte Zertifizierung eines Wasser- und Schifffahrtsamtes und
- > kontinuierliche Fortschreibung der einheitlichen Standards für den Küsten- und Binnenbereich

werden vom QMB der Gewässervermessung in der WSV proaktiv unterstützt und 2013 weiter vorangetrieben.

Ergänzend dazu wird mit der testweisen Umsetzung des QM-Regelkreises (KVP) im Binnenbereich begonnen sowie zur veröffentlichten aQua-Version 5.0 eine umfangreiche Informationsveranstaltung durchgeführt werden.

Literatur/Quellen

DIN EN ISO 9001:2008-12: Titel (deutsch): Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen (ISO 9001:2008); Dreisprachige Fassung EN ISO 9001:2008

Internet: Qualitätsmanagement,

<http://www.wikipedia.org/wiki/Qualit%C3%A4tsmanagement> (15.01.2013).

Internet: Managementsysteme, <http://www.quality.de/cms/lexikon/lexikon-m/1496-managementsystem.html> (10.11.2012)

Intranet der WSV: Geschäftsstelle aQua: aQua-Dokumente Version 3.0 & 5.0;

https://intranet.wsv.bvbs.bund.de/fachinformationen/liegenschaft_vermessung/aQua/index.html (26.02.2013)



Kontakt:

Hannes Lutter

Wasser- und Schifffahrtsamt Stralsund
Wamper Weg 5
18437 Stralsund
Tel.: 03831/ 249 260
Fax: 03831/ 249 309
E-Mail: hannes.lutter@wsv.bund.de

Jahrgang: 1972

1992-1997

Studium der Vermessungstechnik (FH) an der
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden
Angestellter im Vermessungsbüro Henschke Dres-
den

1997-1999

Studium der Hydrographie an der HCU Hamburg
Angestellter im Ingenieurbüro Boer Ingenieure
Berlin

seit 1999

Angestellter beim Wasser- und Schifffahrtsamt
Stralsund

Projektbearbeitung:

2002-2008: Projekt zur Einführung von aQua im
Küstenbereich
2008-2011: Geschäftsstellenmitglied in der GS
aQua Küste
seit 2011: Geschäftsstellenmitglied in der GS
aQua WSV

Messunsicherheiten in der Gewässervermessung, Grundlagen und Beispiele für Anwendungsmög- lichkeiten

Harry Wirth

1 Einleitung

Die Unkenntnis oder Fehleinschätzung der tatsächlich erreichten Messgenauigkeiten kann in der Praxis der Gewässervermessung zu Problemen führen. Beispielsweise bei der Einmessung der Komponenten von hydrographischen Vermessungssystemen auf Schiffen, aber auch bei Vergaben von flächenhaften Vermessungen hat das „alte“ Thema Messunsicherheiten neuerdings wieder eine größere Bedeutung. In der Vergangenheit hat man bestimmten Gerätekombinationen konstante pauschale Genauigkeiten zugeordnet. Mit Hilfe moderner Methoden wurde oft bei der Prüfung der Messergebnisse festgestellt, dass dies nicht zutrifft bzw. nicht zutrifft.

Der Glaube an eine „falsche“ Genauigkeit kann bei Verkehrssicherheitsprüfungen gravierende Folgen haben. Deshalb ist **selbst die größte Unsicherheit nicht so gefährlich wie falsche Sicherheit.**

Es lag nahe, ausgehend von einem alles beschreibenden mathematischen Modell der Gewässervermessung Methoden zur Berechnung von Unsicherheiten zu entwickeln. Die Arbeit von HARE (1995) lieferte dazu einen hervorragenden Einstieg. Weil sich die Technik und die Begriffsdefinitionen weiter entwickelt haben und nicht alle Aspekte abgedeckt wurden, die für die Umsetzung im universellen Peilauswerteprogramm (PAUSS) erforderlich sind, wurden die Methoden überarbeitet und ergänzt. Dabei wurden alle Arbeitsprozesse der Gewässervermessung analysiert und Beispiele für Anwendungsmöglichkeiten der kombinierten Standardunsicherheiten zusammengestellt.

2 Grundlagen der Metrologie

Einige in der Metrologie auf den Feldern Standardisierung, Kalibrierung, Labormessungen und Messdienstleistungen führende Organisationen haben das *Joint Committee for Guides in Metrology* (JCGM) gebildet und einen Leitfaden für die Berechnung und Angabe der Unsicherheiten beim Messen erarbeitet (JCGM 2008), abgekürzt GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*). Der Zweck dieses Leitfadens ist es, allgemeingültige Grundlagen für die Vergleichbarkeit von Messergebnissen zu bestimmen.

Das vollständige Ergebnis der Messung einer physikalischen Größe ist das Ermittlungsergebnis (i. d. R. Zahlenwert), ergänzt durch eine quantitative Qualitätsangabe. Die berechtigten Zweifel an der Gültigkeit des Messergebnisses werden als „Unsicherheit“ bezeichnet. Der Begriff Messunsicherheit wird in (JCGM 2008) als ein *dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnte*, definiert.

Bei hydrographischen Vermessungssystemen ist die Ergebnisunsicherheit nicht ohne Weiteres zu bestimmen, da es sich immer um sogenannte Multisensorssysteme und nichtlineare Zusammenhänge zwischen den sensorbezogenen Messergebnissen handelt. Das Zusammenwirken der Einzelsensoren und weiterer Einflussgrößen führt zu einer kombinierten Gesamtunsicherheit des Vermessungssystems.

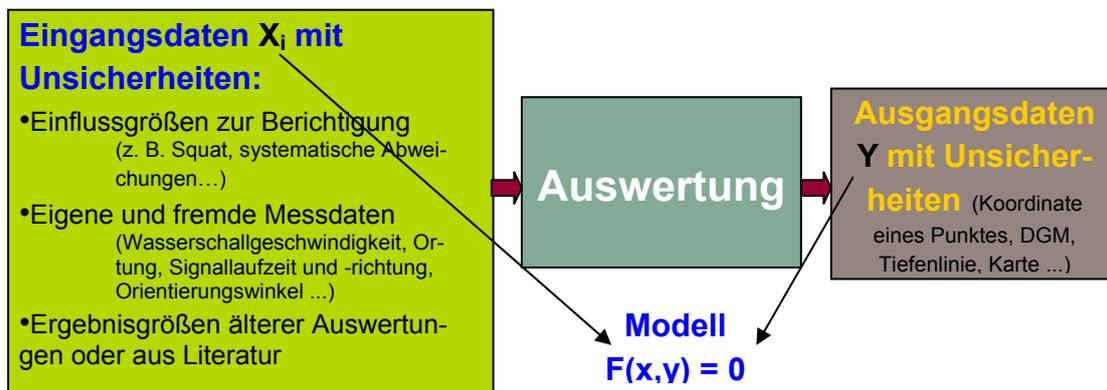


Abb. 1: Zusammenhang zwischen Eingangsdaten und Messergebnis (Ausgangsdaten)

Im Sinne der GUM wird der Betrag und die Unsicherheit eines Ermittlungsergebnisses Y durch Eingangsdaten X_i und deren Unsicherheiten beeinflusst (Abb. 1). Die Genauigkeit des Ermittlungsergebnisses wird außerdem durch die nachfolgende Auswertung beeinflusst. Das JCGM schlägt vor, diesen funktionalen Zusammenhang mit einem mathematischen Modell $F(x,y) = 0$ zu beschreiben. Da die Messunsicherheit in diesem Fall aus einer Anzahl von Eingangsdaten mit entsprechenden Varianzen erhalten wird, wird das Ergebnis als kombinierte Standardunsicherheit bezeichnet.

Der Rechengang ist wie folgt:

1. Mathematisches nicht-lineares Modell mit Eingangsgrößen X_i aufstellen:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

2. Kombinierte Standardunsicherheit (KSU) aus nicht korrelierten Eingangsgrößen berechnen:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)$$

3. Erweiterte (Gesamt-)Unsicherheit ermitteln:

$$U = k u_c(y)$$

Der Erweiterungsfaktor k erhöht den „Grad des Vertrauens“, z. B.: $k = 1,96$ entspricht in etwa 95 % Überdeckungswahrscheinlichkeit bei eindimensionaler Verteilung von y .

4. Messergebnis angeben in der Form: $Y = y \pm U$

Außerdem muss der Messende genau beschreiben, wie er den Wert der Unsicherheit berechnet hat. Dieser Formelapparat erinnert an das sogenannte Fehlerfortpflanzungsgesetz der Statistik. Bei der Berechnung der Unsicherheit werden jedoch auch nicht gemessene oder abgeschätzte Einflussgrößen oder systematische Abweichungen mit einbezogen. Aus diesem Grund wird hier kein Konfidenzintervall mit einem bestimmten Konfidenzniveau berechnet. Das Ausmaß der Vertrauenswürdigkeit wird daher näherungsweise durch den „Grad des Vertrauens“ beschrieben.

Schlussendlich muss das Messergebnis bekanntgegeben werden und zwar in der vorgegebenen Form: Ermittlungsergebnis $Y = y \pm U(\text{nsicherheit})$. Damit wird ein Intervall beschrieben, in dem mit einem Grad des Vertrauens von $x\%$ der wahre Wert liegt.

Prinzipiell wird zur Darstellung des Messergebnisses jedes Sensors ein eigenständiges Koordinatensystem benötigt. Um die Gesamtunsicherheit des Vermessungssystems in einem übergeordneten Koordinatensystem berechnen zu können, muss der funktionale Zusammenhang zwischen allen Systemen hergestellt werden.

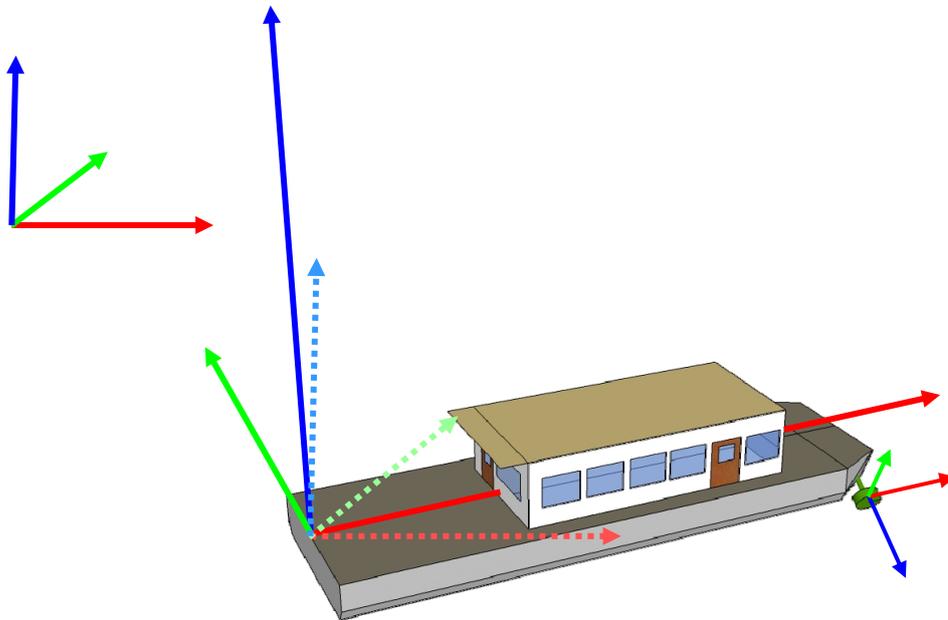


Abb. 2: Zusammenhang zwischen Koordinatensystemen

Zunächst ist aus dem schwingerbezogenen Koordinatensystem S_T eine Transformation in das fahrzeugfeste System S_B und von dort in ein lokales Horizontsystem S_{LL} vorzunehmen. Anschließend werden die Daten in das Nutzersystem S_U überführt bzw. im übergeordneten S_R in Breite, Länge dargestellt.

$$x_{i.Sohle}^R = x_{i.Antenne(\lambda, \varphi, H_{Ellip.})}^R + x_{i.Beschickung}^R + M_{ij.LL}^R \times \left[x_{j.Latency}^{LL} + R^{LL}(\alpha_H, P, R)_{jk.B} \times \left(x_{k.Transducer}^B + R^B(\gamma, \beta, \alpha)_{kl.T} \times \begin{pmatrix} 0 \\ -r \sin \theta \\ r \cos \theta \end{pmatrix}_T - x_{k.Antenne}^B \right) \right]$$

Formel 1: Gesamtmodell Gewässervermessung

Das Gesamtmodell in der Gewässervermessung beschreibt den gesuchten funktionalen Zusammenhang zwischen den hier gezeigten Koordinatensystemen und Einflussgrößen. Der Vektor $x_{i,Sohle}^R$ beschreibt das Endergebnis, nämlich die Koordinaten der Sohle im Reference Frame S_R . Die Drehmatrizen werden mit Großbuchstaben R bezeichnet. Die Winkel α, β, γ bezeichnen die Einbaulage der Schwinger relativ zum schiffsfesten Koordinatensystem S_B . Die Messgrößen r und θ beschreiben die Polarkoordinaten im schwingerfesten Koordinatensystem S_T . Die Vektoren $x_{j,Antenne}^B$ in S_B sind die Einmessungsergebnisse für die Sensoren (hier: GNSS-Antenne). Mit der Matrix $M_{ij,LL}^R$ werden die Koordinaten aus dem lokalen Horizontsystem S_{LL} in das S_R transformiert.

Im nachstehenden Ursache-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa-Diagramm) sind die Einflussgrößen auf die Genauigkeit der Tiefe und Position dargestellt.

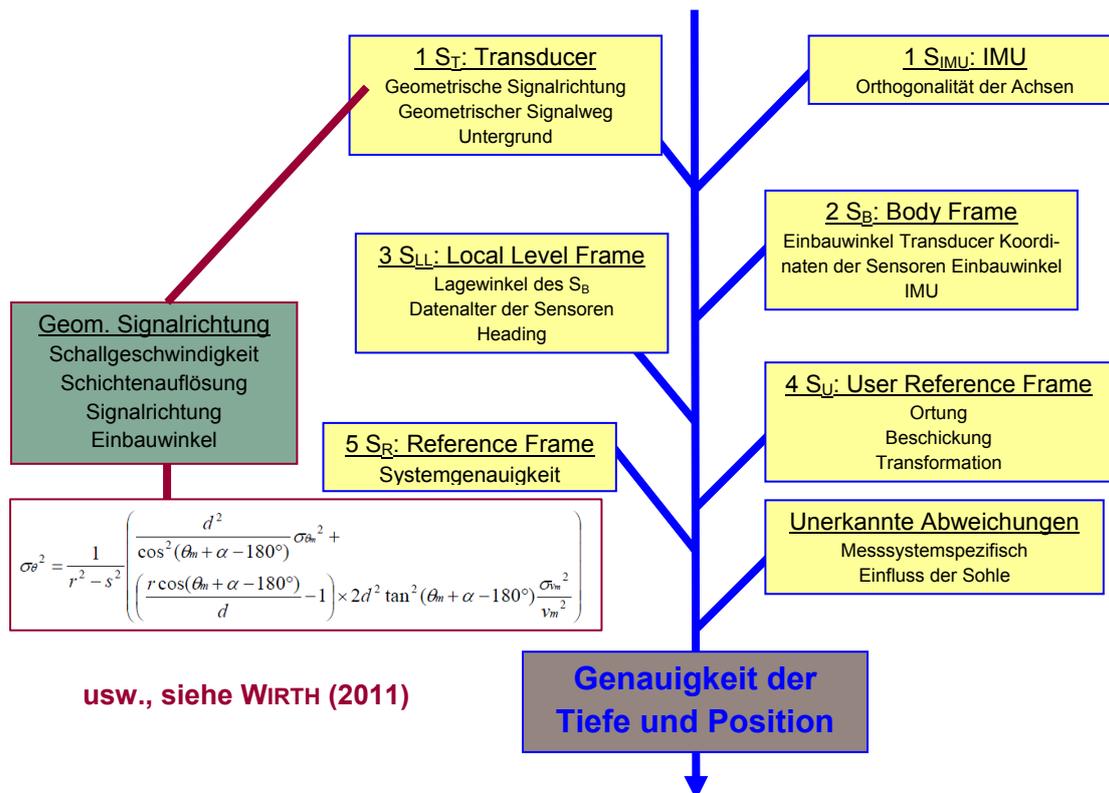


Abb. 3: Einflussgrößen auf die Genauigkeit der Tiefe und Position

In jedem Koordinatensystem kommen neue Einflussgrößen hinzu, beispielsweise beim Übergang vom fahrzeugfesten System S_B ins lokale Horizontsystem S_{LL} die Lagewinkel Pitch, Roll, Heading und das Datenalter (Latency) der Sensoren. Für alle hier genannten Einflussgrößen wurden funktionale Zusammenhänge formuliert und entsprechend der GUM Varianzen berechnet.

Bei den Messungen im Transducer ist beispielsweise die Genauigkeit der geometrischen Signalrichtung zu quantifizieren. Diese wird wiederum von weiteren Größen, wie der gemessenen Schallgeschwindigkeit, der Schichtenauflösung, der Signalrichtung und den Einbauwinkeln beeinflusst. Die Varianz der Geometrischen Signalrichtung wird mit der in Abb. 3 dargestellten Formel berechnet. Entsprechend komplex sind die Zusammenhänge bei den anderen Einflussgrößen. Weitere Details können von WIRTH (2011) entnommen werden.

Das Ursache-Wirkungs-Diagramm setzt sich für die Prozessschritte während der Auswertung fort. Da der Kunde in der Regel die Produkte erhält, die einem Auswerteprozess unterliegen, wurden Formeln entwickelt, mit denen auch für die finalen Produkte der Gewässervermessung softwaregestützt automatisch Genauigkeitsangaben erzeugt werden können.

3 Anwendungsbeispiele für Unsicherheiten

Die beschriebene Methode ist gleichermaßen für alle Vermessungssysteme, d. h. für Vermessungssysteme mit Einzelecholoten oder Fächerloten oder Laserscanner geeignet. Mögliche Anwendungsbereiche sind:

1. Ableitung von Fehlergrenzen für Vergaben oder Ähnliches
2. Beurteilung der Einmessung und Inbetriebnahme von Vermessungssystemen
3. Messplanung, Aufstellen von Messprogrammen zur Ingenieurvermessung (Bauwerksinspektion)
4. Plausibilisierung und Modellierung
5. Qualitätsangaben für Produkte nach [aQua](#)[®]

3.1 Fehlergrenzen

Es ist allgemein üblich, die Genauigkeitsanforderungen durch bestimmte einzuhaltende Grenzwerte zu definieren. Pauschalierte Minimalstandards sind für sogenannte Mehrzweckmessungen (eine Messung für vielfältige Anwendungen) denkbar, bei Vergaben sind sie zwingend als Kriterium zur Prüfung der Leistung erforderlich.

Im IHO-Standard S44 (IHO 2008) wird empfohlen, Fehlergrenzen durch folgende Formel für einen Grad des Vertrauens von 95 % zu berechnen:

$$U = \text{SQRT}(a^2 + (b * d)^2)$$

a = fester Wert, b = prozentuale Unsicherheit, d = Tiefe

Wir sehen einen festen Anteil und einen Anteil, der sich mit der Tiefe ändert. Für definierte Messgebiete wurden im maritimen Bereich angepasste Werte definiert, die jedoch im Binnenbereich weit über den benötigten Anforderungen liegen. Die Aufgabe des Vermessers ist es, die Parameter a und b entsprechend der Leistungsfähigkeit seiner Geräte so festzulegen, dass diese Grenzen mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand eingehalten werden können.

Dies kann mit Unterstützung durch ein **Planungs- und Analysetool** erfolgen. Die BfG hat alle 73 Einflussgrößen modelliert und prototypisch eine Anwendung entwickelt, mit der Diagramme der sich ergebenden Tiefen- und Positionierungsgenauigkeit erstellt werden können.

Das Peilschiff ist mit drei Fächerloten ausgerüstet, wobei wir im Diagramm nur den Zentralschwinger betrachten (Abb. 4). In diesem Diagramm sind Kurven der Tiefenmessunsicherheit mit einem Grad des Vertrauens (GdV) von 95 % über den Beamwinkeln des Fächerlots aufgetragen. Die beiden dargestellten Kurven ergeben sich, wenn alternativ die Bug- oder die Heck-GNSS-Antenne verwendet werden.

Im Diagramm wurden außerdem zwei Fehlergrenzen eingezeichnet. Die gelbe Linie zeigt die höchste Anforderung im IHO-S44-Standard, die offensichtlich weit über der im Binnenbereich erreichbaren Genauigkeit liegt. Die zweite Fehlergrenze (die grüne Linie), deren Einhaltung angestrebt wird, wird überschritten.

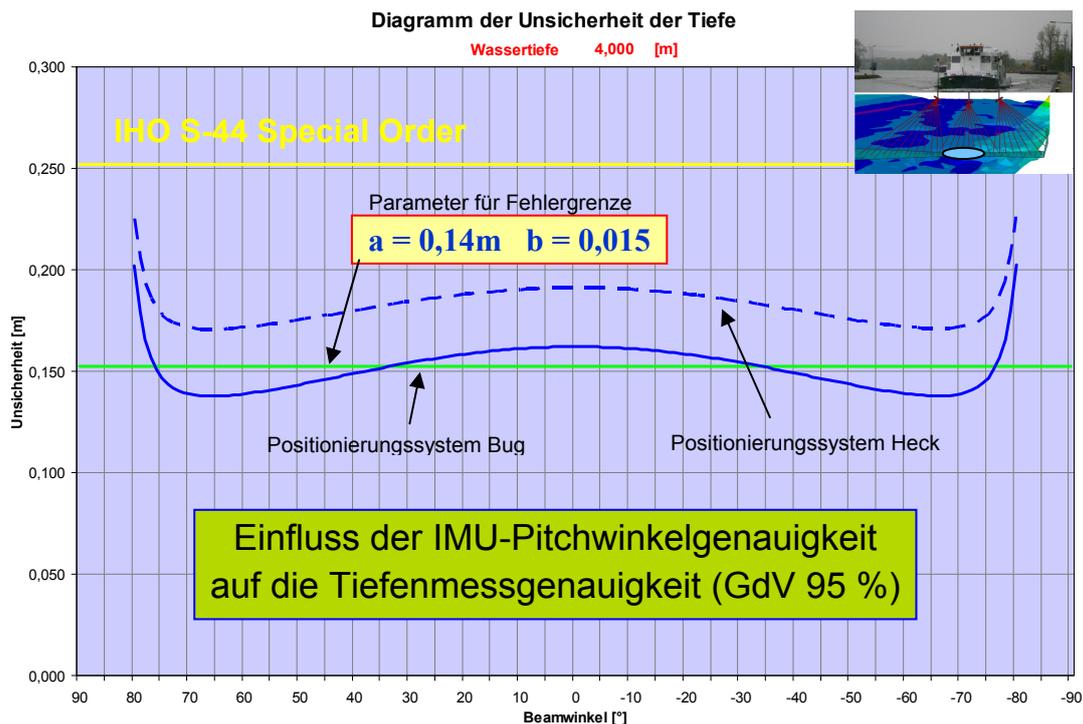


Abb. 4: Tiefenmessunsicherheit eines Fächerlots mit fehlerhafter Einmessung der IMU

Daraus könnte man folgern, dass eine zu optimistische Fehlergrenze definiert wurde. Bei der Analyse der Einzelunsicherheiten der Einflussgrößen zeigte sich jedoch, dass die geringe Genauigkeit des Pitchwinkels zu der signifikanten Verschlechterung für die Tiefenmessgenauigkeit führt, insbesondere wenn man die Heck-GNSS-Antenne benutzen würde.

Die Methode liefert den konkreten Hinweis, welche Einflussgrößen zu verbessern sind. In diesem Fall war die geforderte Messgenauigkeit ohne Verbesserung der Einmessung nicht zu erreichen.

3.2 Allgemeine Messplanung und Messprogramme für die Bauwerksinspektion

Für die tägliche Messplanung ist vorab zu klären, ob mit den Systemeinstellungen die geforderte Genauigkeit und Messpunktdichte erreicht wird. Insbesondere bei der Inspektion von Unterwasser-Bauwerken ist die Aufstellung von Messprogrammen gefordert, in denen entsprechend den Anforderungen vorab messtechnische Lösungskonzepte beschrieben werden müssen.

Das angesprochene **Planungs- und Analysetool** ist ein geeignetes Werkzeug, um die Eignung der Systemeinstellungen zu prüfen. Dabei wird durch Variieren der Eingangsgrößen bestimmt, welcher maximale Öffnungswinkel bei Fächerloten erlaubt ist, welche Einmessgenauigkeit und welche Genauigkeit für die Schallgeschwindigkeitsprofile erforderlich sind usw.

Mit diesen Parametern werden dann die notwendigen Vorgaben für die Messplanung abgeleitet. Der Anwender kann nun qualitätsgesichert die Messstreifenbreite, die Überlappung der benachbarten Messstreifen, die Messstreifenanzahl, die Dichte und den zeitlichen Abstand der Schallprofilmessungen sowie die maximale Geschwindigkeit über Grund festlegen.

Nach den Erkenntnissen aus dem in Abb. 4 gezeigten Diagramm wurden die Eingangsdaten der Einmessung verbessert. Die Überprüfung der Kalibrier- und Schallprofilmessgenauigkeit ergab keinen Anpassungsbedarf. In Abb. 5 ist zu sehen, dass die vorgegebene Fehlergrenze mit den geänderten Parametern eingehalten werden kann. Allerdings muss in Bereichen mit genähert horizontaler Sohle der Öffnungswinkel auf 75° begrenzt werden.

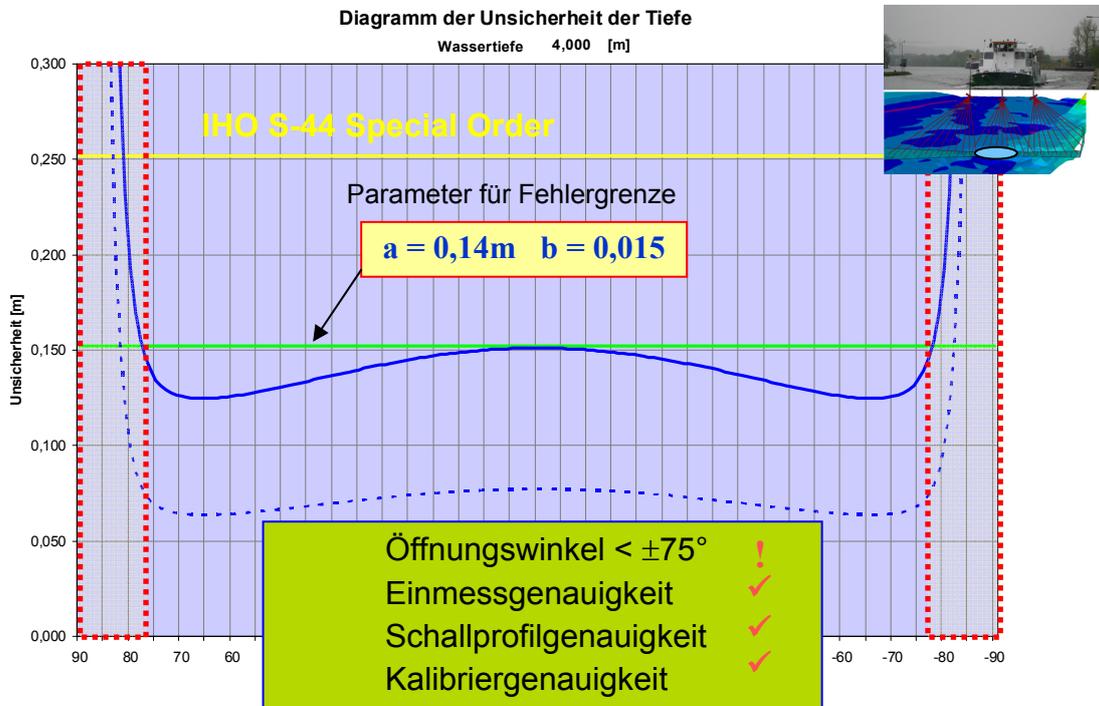


Abb. 5: Tiefenmessunsicherheit des in Abb. 4 gezeigten Fächerlots mit optimierten Einflussparametern

3.3 Kombinierte Standardunsicherheiten und erweiterte Gesamtunsicherheiten in der Auswertung

Im IHO-Standard S44 (IHO 2008) wird empfohlen, mit statistischen Methoden getrennt für die horizontale Position und die Tiefen Unsicherheiten mit einem Grad des Vertrauens von 95 % zu berechnen. Die Ergebnisunsicherheit wird als *total horizontal uncertainty* (THU), respektive *total vertical uncertainty* (TVU) bezeichnet. Dabei sollen alle Parameter berücksichtigt werden, die Beiträge für die Unsicherheit liefern. Dies entspricht dem Grundgedanken der GUM, wobei dies in der GUM als erweiterte Gesamtunsicherheit bezeichnet wird.

Mit kombinierten Standardunsicherheiten (KSU) kann man automatisch die Gesamtunsicherheit für die Produkte berechnen. Dazu werden zunächst bei der Plausibilisierung und der Modellierung die Koordinaten entsprechend ihrer a priori Genauigkeit mit den KSU gewichtet. Das ist kein Selbstzweck, sondern hat in erster Linie positive Auswirkungen, weil die Ausreißersuche zuverlässiger wird und die Modellhöhen genauer werden. Wenn die Eingaben für die Varianzen der Einflussgrößen jedoch unrealistisch wären, würde der Wert der Gesamtunsicherheit ebenfalls negativ beeinflusst.

Spezifische Genauigkeitsangaben für jede gelieferte Koordinate oder jeden Modellstützpunkt haben für den Kunden einen geringen praktischen Nutzen, weil sich bei geschickter Messplanung die Unsicherheiten der Einzeltiefen nur wenig unterscheiden. Der praktische Informationsnutzen ist maximal, wenn man eine Angabe zur globalen, durchschnittlichen Genauigkeit macht.

Das Resultat der Plausibilisierung oder Modellierung ist jeweils ein Produkt, oder das Modell wird z. B. in einer Karte dargestellt. Den Kunden interessiert in der Regel die durchschnittliche (globale) Gesamtunsicherheit des Endprodukts. Die globale Gesamtunsicherheit wird berechnet, indem man den Durchschnitt (aller punktbezogenen) Standardunsicherheiten mit dem Erweiterungsfaktor passend für den gewünschten Grad des Vertrauens skaliert.

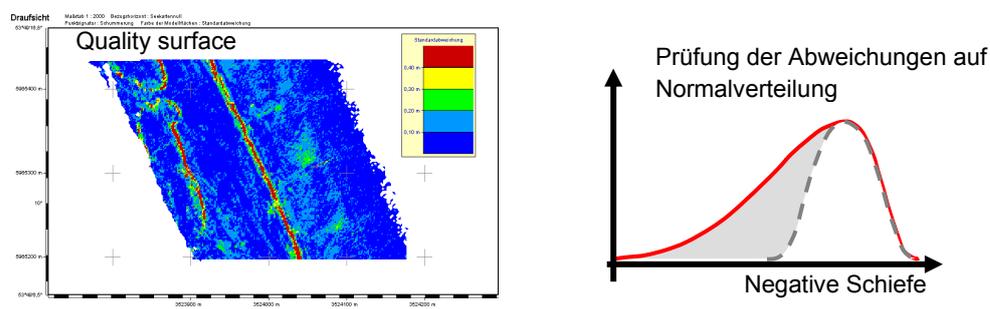


Abb. 6: Prüfung der Gültigkeit von Gesamtunsicherheiten mit *quality surface* und Verteilung

Ob der Durchschnittswert „Gesamtunsicherheit“ repräsentativ die Genauigkeit des Produkts beschreibt, muss deshalb durch die Auswerter auf verschiedene Weise geprüft werden:

1. Die Qualität des Modells kann z. B. anhand der Abweichungen der Messwerte zur berechneten Modelloberfläche geprüft werden. Abbildung 6 zeigt links das berechnete DGM, wobei die Oberfläche entsprechend den erreichten Standardabweichungen farblich kodiert wurde. Die roten Bereiche zeigen bei linienhafter oder bandförmiger Struktur vorhandene natürliche Bruchkanten. Bei unregelmäßiger Anhäufung deutet es eher auf eine wenig erfolgreiche Plausibilisierung hin. Dies ist in den grünen Bereichen der Fall. Hier hat die visuelle Nachprüfung lokale Abweichungen von mehreren dm ergeben. Im Beispiel bestünde also noch Nachbesserungsbedarf bei der Plausibilisierung.
2. Wenn die Abweichungen der Messwerte zur Modelloberfläche normal verteilt sind, bzw. nach oben und unten symmetrisch verteilt sind, war die Plausibilisierung erfolgreich. In der gezeigten Verteilung (Abb. 6, rechts) sieht man eine gewisse **Schiefe**, was ein eindeutiger Hinweis darauf ist, dass hier noch Messfehler enthalten sind. In der Software werden deshalb mit Methoden der Statistik höhere Momente der Zufallsvariablen berechnet, so dass auch anhand der Schiefe und Wölbung (Exzess oder Kurtosis) die Gültigkeit der Gesamtunsicherheit gut beurteilt werden kann.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Kunde hat das Recht auf Erfüllung der Anforderungen. Dazu benötigt er nachvollziehbare und vergleichbare Qualitätsangaben, die quantitativ in Form von Messunsicherheiten mit einem vereinbarten Grad des Vertrauens beschrieben werden.

Die Verfahren, mit denen die kombinierte Standardunsicherheit (KSU) der Koordinatentripel in der Gewässervermessung für alle Bauarten der Tiefenmesssysteme berechnet werden können, wurden von HARE (1995) und WIRTH (2011) umfassend beschrieben. Die dort aufgelisteten Methoden erlauben die bestmögliche, automatische und programmgestützte Berechnung der Unsicherheit von Einzelmesswerten bzw. Koordinaten. Dies kann bei der Auswertung von Massendaten die Suche nach Ausreißern erleichtern und die Schätzverfahren für die Modellhöhen verbessern sowie die automatische softwaregestützte Berechnung von Produktgenauigkeiten ermöglichen.

Die für die Auswertung benötigten Algorithmen werden im IT-Verfahren PAUSS (Peilauswertesoftware) realisiert. Bei Verwendung marktüblicher Software besteht für den Bediener jedoch das Problem, dass die Art und Wirkung der angewendeten Methoden eher untransparent sind. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse beurteilen zu können, ist es für den Bediener daher unumgänglich, auf einer vollständigen Dokumentation der Algorithmen zu bestehen.

Darüber hinaus empfiehlt die BfG, ein Planungs- und Analysetool (Arbeitstitel "Hydrography-Analyst") zu entwickeln, das man für folgende Zwecke einsetzen kann:

- > Berechnung der erzielbaren Tiefenmessgenauigkeit
- > Berechnung der erzielbaren Positionierungsgenauigkeit
- > Messplanung
- > Berechnung der Detektierbarkeit von Objekten bestimmter Größe
- > Ableitung von Fehlergrenzen

Dieses Werkzeug würde dazu beitragen, hohen Auswerteaufwand wegen unzureichender Genauigkeit von vorneherein zu vermeiden, die Sicherheit bei der Hindernissuche zu vergrößern und bei Vergaben erreichbare und damit einforderbare Genauigkeiten zu vereinbaren.

Literatur

- HARE, R. (1995): Depth and Position Error Budgets for Multibeam Echosounding, International Hydrographic Review, Monaco, LXXII(2).
- IHO (2008): International Hydrographic Organization Special Publication N° 44, Standards for Hydrographic Surveys, 5th Edition February 2008.
- JCGM member organizations (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML) (2008): Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), JCGM 100:2008.
- WIRTH, H. (2011): Messunsicherheiten in der Gewässervermessung, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht BfG-1734, Koblenz.



Kontakt:

Harry Wirth

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Am Mainzer Tor 1

56068 Koblenz

Tel.: 0261/ 1305 5232

Fax: 0261/ 1306 5088

E-Mail: wirth@bafg.de

Jahrgang: 1959

1980-1986

Studium Geodäsie an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

1986-1988

Referendariat in Nordrhein-Westfalen

seit 1988

wissenschaftlicher Mitarbeiter und Ansprechpartner für Gewässer- und Objektvermessung in der Bundesanstalt für Gewässerkunde

seit 2010

Stellvertreter des Referatsleiters Geodäsie in der BfG

Aufgabenschwerpunkte:

Entwicklung und Erprobung von Mess- und Auswertesystemen (z.B. GNSS, Triple head-Fächerlot, Auswertemethoden für Massendaten)

Beratung und Unterstützung der WSV bei der Umsetzung neuer Techniken

Ingenieurgeodätische Fragestellungen bei der Einmessung von Vermessungsschiffen

Thomas Brüggemann

1 Einleitung

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) setzt seit 1999 für die verschiedenen Aufgaben in der Gewässervermessung Fächerlotsysteme ein. Um zufriedenstellende Messergebnisse zu erreichen, hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) seinerzeit federführend für die WSV Standards zur Bestimmung der Schiffskoordinaten und der Einbauwinkel der Messsystemkomponenten definiert. Mit der Beschaffung von sogenannten Triple-Head-Fächerlotsystemen und integrierten Navigationssystemen sind die Anforderungen an die Messunsicherheit der Einmessung u. a. aufgrund der wesentlich größeren einbaubedingten Exzentrizitäten der Sensoren erheblich gestiegen, so dass die bisher geltenden Arbeitsanweisungen anzupassen sind.

2 Anforderungen an die Einmessung

Ein Fächerlotsystem besteht aus einer Vielzahl verschiedener Sensoren (z. B. Fächerlottransducer, Inertiale Messeinheit (IMU), verschiedene GNSS-Antennen) (s. Abb. 1). Aufgrund der unterschiedlichen Einbauorte auf dem Schiff mit teilweise recht großen einbaubedingten Exzentrizitäten kommt der Einmessung des Messsystems und deren Messunsicherheit eine besondere Bedeutung zu. Alle Sensoren sind in ein fahrzeugfestes Koordinatensystem qualitätsgesichert einzumessen. Zusätzlich müssen die entsprechenden Einbauwinkel der Transducer und der IMU sowie die Heading-Nullablage des integrierten Navigationssystems getrennt voneinander und unabhängig von anderen Einflussgrößen bezogen auf das Schiffskoordinatensystem S_B bestimmt werden.

Mit Feldverfahren lassen sich die Einflüsse der Einbauwinkel und Nullablagen der verschiedenen Sensoren nicht voneinander trennen bzw. sie liefern Ergebnisse, die nicht genau genug sind. Beispielsweise kann der Einbauwinkel der IMU in Schiffslängsrichtung (Pitch) nicht unabhängig von Beschickungs- und Tiefenmessfehlern bestimmt werden. Trotzdem darf auf die Feldkalibrierungen zur Überprüfung des Messsystems nicht verzichtet werden, da diese wichtige Indikatoren für mögliche Systemveränderungen sind.

Allein die Anteile der Messunsicherheiten der Schiffskoordinaten der Sensoren sowie der Einbauwinkel und Nullablagen haben u. a. in Abhängigkeit der Exzentrizitäten, der Beamwinkel der Transducer und der Wassertiefe einen Einfluss auf die Gesamtmessunsicherheit der Tiefen und der Positionen von ca. 25 % bis 50 % (WIRTH 2011).

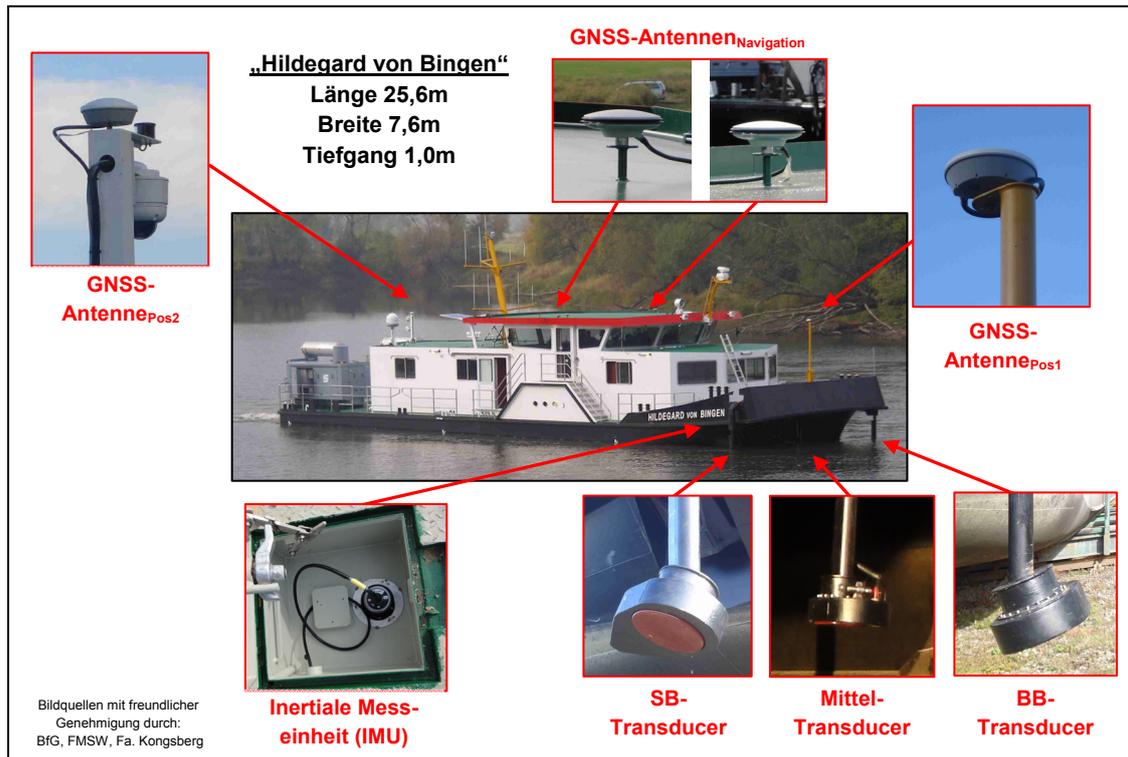


Abb. 1: Sensoren eines Fächerlotsystems (Triple-Head-System)

Das Ziel muss es sein, diesen Anteil mit einem vertretbaren Aufwand zu minimieren und die Sensoren so genau wie möglich einzumessen. Die Schiffskordinaten der Sensoren (σ_x , σ_y , und σ_z) lassen sich mit der heute in der Ingenieurvermessung standardmäßig eingesetzten Messtechnik (Tachymeter, Laserscanner, ...) mit einer Messunsicherheit besser als 5 mm bestimmen.

Die Einbauwinkel der Transducer sollten mit einer Messunsicherheit besser als $0,1^\circ$ bestimmt werden. Die Einbauwinkel der IMU und die Nullablage des Headings des Navigationssystems dürfen nicht schlechter als die Messunsicherheit der Sensoren selbst sein (beispielsweise für die IMU σ_{Roll} und $\sigma_{\text{Pitch}} < 0,05^\circ$ und $\sigma_{\text{Yaw}} < 0,1^\circ$ sowie für das Heading $\sigma_{\text{Heading}} < 0,1^\circ$).

Da die Winkel aus Koordinaten abgeleitet werden müssen, werden hier teilweise Standardmessunsicherheiten der Koordinaten von $< 0,5$ mm gefordert. Dies stellt, insbesondere bei den Rahmenbedingungen auf einem Schiff und der entsprechenden Umgebung einer Bauwerft, eine messtechnische Herausforderung dar. Um diese Anforderung zu erreichen, müssen entsprechende Messsysteme und -verfahren aus dem Bereich der Ingenieurvermessung eingesetzt werden.

3 Definition des Schiffskordinatensystems

Alle Sensoren sind in ein fahrzeugfestes Schiffskordinatensystem S_B (s. Abb. 2) einzumessen. Es handelt sich bei dem Schiffskordinatensystem um ein Rechtssystem (rechtshändiges Koordinatensystem), wobei die X_B -Achse der Schiffsachse vom Heck zum Bug entspricht, die Y_B -Achse von der Steuerbordseite zur Backbordseite verläuft und die Z_B -Achse aufwärtsgerichtet ist. Der Koordinatenursprung liegt im Heckbereich auf Höhe der Wasserlinie. Bei der Einmessung werden verschiedene Punkte unterschieden: Passpunkte, Sensorpunkte, Wasserlinienmarken und Punkte auf Höhe der tatsächlichen Wasserlinie.

Die Passpunkte repräsentieren das Schiffskordinatensystem und sind dauerhaft am Schiff entsprechend den örtlichen Verhältnissen zu vermarknen. Wenn die tatsächliche Wasserlinie z. B. bei Schiffsneubauten während der Einmessung auf der Helling nicht ausreichend genau bekannt ist, können Wasserlinienmarken etwas oberhalb der zu erwartenden Wasserlinie dauerhaft angebracht werden.

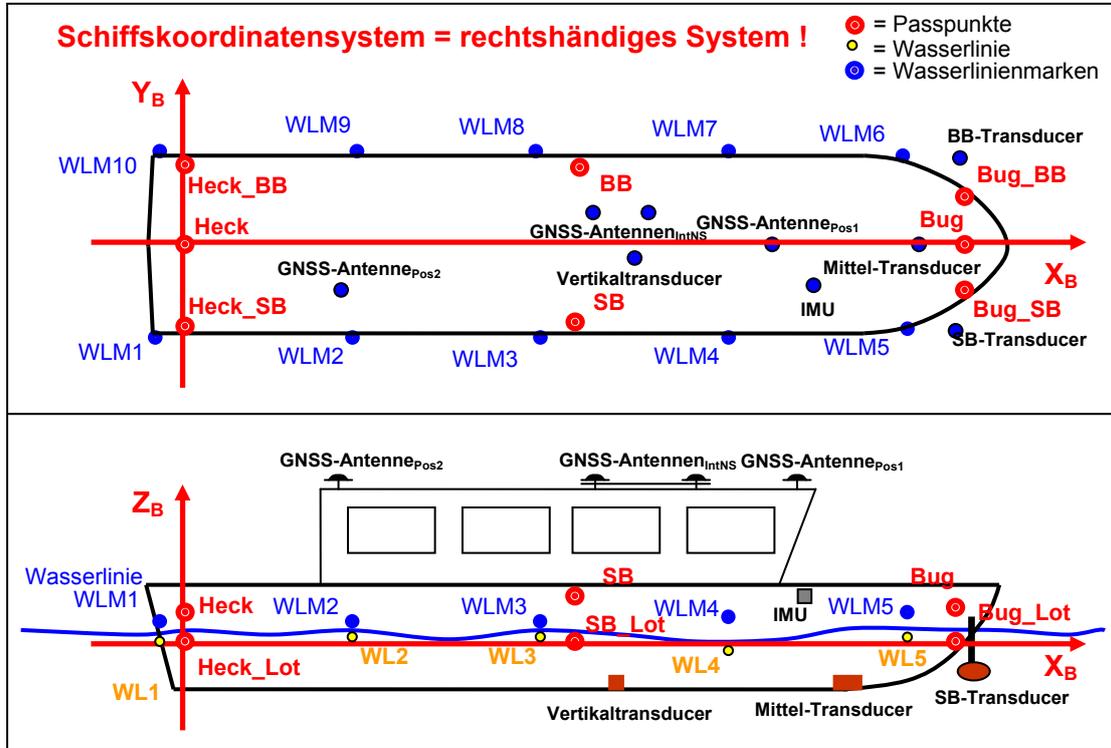


Abb. 2: Definition des Schiffskordinatensystems

4 Einmessung aller Punkte ins Schiffskordinatensystem

Die Einmessung aller Punkte erfolgt auf der Helling und muss so angelegt und durchgeführt werden, dass grobe Fehler bereits vor Ort erkannt oder bei der späteren Auswertung zuverlässig eliminiert werden können. Alle Punkte sind von mindestens zwei Standpunkten aus aufzumessen und die Koordinaten sind durch eine Netzausgleichung zu bestimmen. Die Netzausgleichung dient hier neben der Genauigkeitssteigerung im Wesentlichen dem Nachweis der erreichten Messunsicherheiten. Die jeweiligen Unsicherheiten der Koordinaten sind zu dokumentieren und in der weiteren Berechnung mitzuführen. Üblicherweise erfolgt die örtliche Einmessung in einem örtlichen geodätischen Koordinatensystem (linkshändiges Koordinatensystem). Daher sind diese Koordinaten nach der Netzausgleichung und vor den weiteren Berechnungen in ein mathematisches Rechtskoordinatensystem zu überführen.

Um das Schiffskordinatensystem in der weiteren Berechnung in die Wasserlinien-Ebene legen zu können, werden nach der Einmessung auf der Helling die Abstände zwischen den eingemessenen Wasserlinienmarken und der tatsächlichen Wasseroberfläche in ruhigem Wasser bestimmt. Die Abstandsmessungen sollten bei mittleren Beladungszuständen durchgeführt werden. Während der Messungen sind Umballastierungen oder sonstige Massenverlagerungen z. B. durch umherlaufende Personen zu vermeiden.

Aus den Punkten der tatsächlichen Wasserlinie (WL1 bis WL10) wird zunächst eine ausgleichende Wasserlinien-Ebene abgeleitet. Für die Transformation der örtlichen Koordinaten in das Schiffskoordinatensystem werden für die Passpunkte Schiffskoordinaten festgelegt. Hierzu werden für die Punkte Heck, Bug, BB und SB (s. Abb. 3) die Lotfußpunkte Heck_Lot, Bug_Lot, BB_Lot und SB_Lot berechnet.

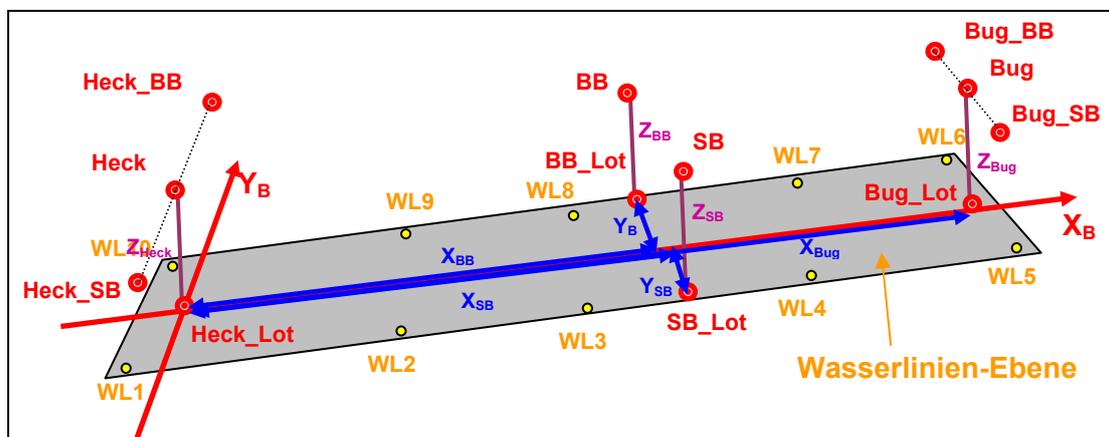


Abb. 3: Festlegung der Wasserlinien-Ebene und Festlegung des Schiffskoordinatensystems

Aus den entsprechenden Raumstrecken und Abständen ergeben sich die Schiffskoordinaten der Passpunkte, mit deren Hilfe die örtlichen Koordinaten aller Punkte ins Schiffskoordinatensystem transformiert werden können.

Tabelle 1

Koordinaten der Passpunkte im Schiffskoordinatensystem

Punkt	X_B	Y_B	Z_B
Heck	0,000	0,000	Z_{Heck}
Bug	X_{Bug}	0,000	Z_{Bug}
BB	X_{BB}	Y_{BB}	Z_{BB}
SB	X_{SB}	Y_{SB}	Z_{SB}

5 Bestimmung der Einbauwinkel der Transducer

Bei Transducern mit einer ebenen Oberfläche können die Einbauwinkel (Roll-, Pitch- und Gierwinkel) beispielsweise aus vier auf der Transducerebene oder parallel hierzu liegenden Punkten P1 bis P4 bestimmt werden (s. Abb. 4).

Die vier Punkte sind hierzu in das Schiffskoordinatensystem einzumessen. Um die geforderte Standardmessunsicherheit für die Einbauwinkel von $0,1^\circ$ zu erreichen, müssen diese in Abhängigkeit des jeweiligen Punktabstandes eine entsprechende Punktunsicherheit aufweisen. Bei einem Punktabstand von 30 cm müssten die Koordinaten der Punkte eine Standardmessunsicherheit 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.

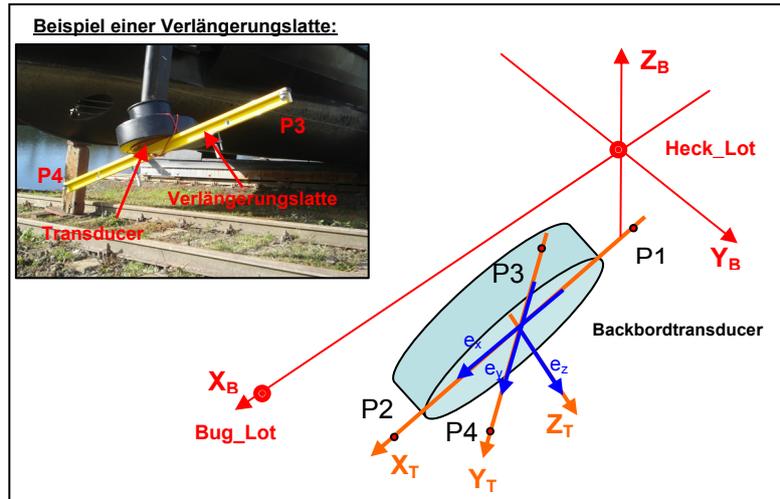


Abb. 4: Bestimmung der Einbauwinkel der Transducer (Beispiel BB-Transducer)

Für jeden Transducer werden aus den vier Punkten P1 bis P4 die Einheitsvektoren \mathbf{e}_x und \mathbf{e}_y sowie der Normaleneinheitsvektor \mathbf{e}_z berechnet und hieraus die Drehmatrix aufgestellt, aus welcher sich die Einbauwinkel berechnen lassen (WIRTH 2011).

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

Transducer-Einbauwinkel_{Roll}:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{e_{y.3}}{e_{z.3}}\right)$$

Transducer-Einbauwinkel_{Pitch}:

$$\beta = \arctan\left(\frac{e_{x.3}}{\sqrt{e_{y.3}^2 + e_{z.3}^2}}\right)$$

Transducer-Einbauwinkel_{Gier}:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{e_{x.2}}{e_{x.1}}\right)$$

Da das geometrische Zentrum der Transduceroberfläche i. d. R. mit dem akustischen Zentrum des Transducers nicht identisch ist (s. Abb. 5), müssen die Schiffskoordinaten des akustischen Zentrums beispielsweise mit Hilfe einer Transformation des Transducer-Koordinatensystems S_T ins Schiffskoordinatensystem S_B bestimmt werden.

Als identische Punkte dienen die vier Punkte P1 bis P4, für die die Schiffskoordinaten bestimmt wurden. Für diese vier Punkte werden die Koordinaten im Transducer-Koordinatensystem definiert. Hierzu wird zunächst mit Hilfe einer Geradengleichung der Schnittpunkt der Gerade P1-P2 und der Gerade P3-P4 bestimmt. Die entsprechenden Abstände x_{p_i} und y_{p_i} der vier Punkte zum Schnittpunkt ergeben die jeweiligen Koordinatenkomponenten des Transducer-Koordinatensystems.

Wenn die vier Punkte P1 bis P4 nicht direkt auf der Transducerebene sondern in einer hierzu parallelen „Messebene“ liegen, muss der Abstand a zwischen den beiden Ebenen in der Z_T -Koordinate entsprechend berücksichtigt werden. Die Exzentrizitäten x_{az} , y_{az} und z_{az} zwischen dem geometrischen und dem akustischen Zentrum sind den Herstellerangaben zu entnehmen.

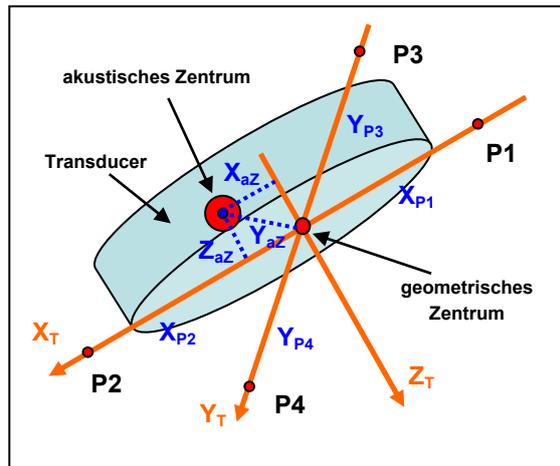


Abb. 5: Akustisches Zentrum des Transducers (Beispiel BB-Transducer)

Tabelle 2

Koordinaten der Passpunkte im Transducer-Koordinatensystem

Punkt	X_T	Y_T	Z_T
P1	$-X_{P1}$	0,000	0,000 bzw. a
P2	X_{P2}	0,000	0,000 bzw. a
P3	0,000	$-Y_{P3}$	0,000 bzw. a
P4	0,000	Y_{P4}	0,000 bzw. a
geometrisches Zentrum	0,000	0,000	0,000
akustisches Zentrum	X_{az}	Y_{az}	$-Z_{az}$

Durch eine Transformation der Transducer-Koordinaten ins Schiffskoordinatensystem erhält man die erforderlichen Schiffskoordinaten für das geometrische und akustische Zentrum.

6 Bestimmung der Einbauwinkel der IMU

Die Verdrehung der X_{IMU} -Achse der IMU gegenüber der X_B -Achse des Schiffskoordinatensystems um die Z_B -Achse (IMU-Einbauwinkel γ_{aw}) wird mit Hilfe der beiden Punkte P1 und P2 bestimmt (s. Abb. 6) und soweit möglich einbautechnisch korrigiert. Die exakte Yaw-Ausrichtung der IMU-Grundplatte kann beispielsweise über entsprechende Langlochschrauben erfolgen, wobei jede Ausrichtungskorrektur durch eine erneute Messung über die Punkte P1 und P2 zu prüfen ist.

Um die geforderte Unsicherheit für die Yaw-Ausrichtung von $0,1^\circ$ in Bezug auf das Schiffskoordinatensystem zu erreichen, müssen die Koordinaten der beiden Punkte in Abhängigkeit des jeweiligen Punktabstandes eine entsprechend geringe Messunsicherheit haben. Auch hier muss i. d. R. für die Vergrößerung der Punktabstände eine entsprechend geeignete Verlängerungslatte verwendet werden, die entlang der Zwangszentrierstifte der IMU-Grundplatte ausgerichtet wird.

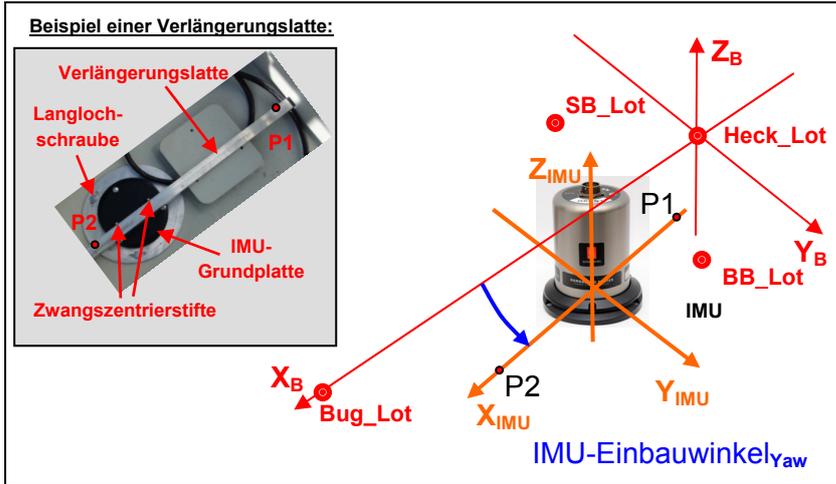


Abb. 6: Bestimmung des IMU-Einbauwinkel_{Yaw}

Für die Bestimmung der Einbauwinkel der IMU bezogen auf das Schiffskordinatensystem um die X-Achse (IMU-Einbauwinkel_{Roll}; s. Abb. 7) und um die Y-Achse (IMU-Einbauwinkel_{Pitch}; s. Abb. 8) müssen während der Einmessung auf der Helling die Winkel der IMU (Roll und Pitch) über einen ausreichend langen Zeitraum aufgezeichnet werden. Die Einbauwinkel der IMU ergeben sich aus der Schiefelage des Schiffskordinatensystems S_B und des örtlichen Koordinatensystems $S_{ÖKS}$ auf der Helling sowie den Mittelwerten der aufgezeichneten Roll- und Pitchwinkel der IMU.

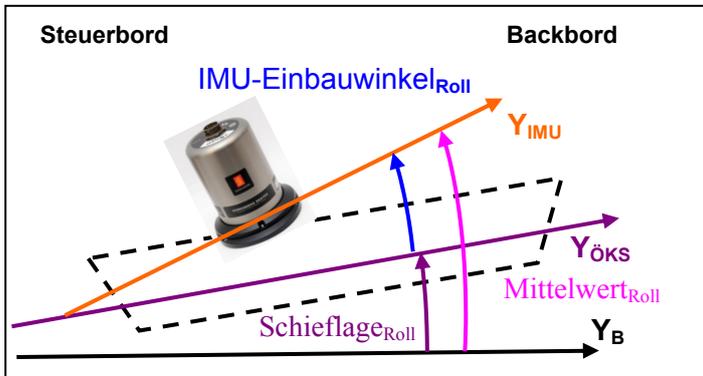


Abb. 7: IMU-Einbauwinkel_{Roll}

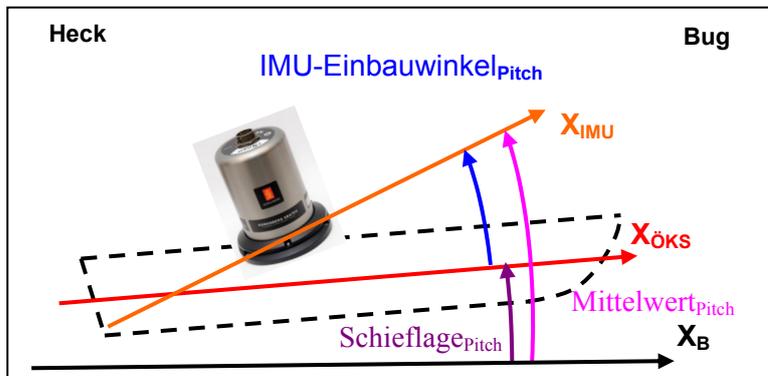


Abb. 8: IMU-Einbauwinkel_{Pitch}

7 Berechnung der Heading-Nullablage

Die Heading-Nullablage des integrierten Navigationssystems mit zwei getrennten GNSS-Antennen (s. Abb. 9) ergibt sich aus der Richtungsdifferenz der Koordinaten der beiden GNSS-Antennen im Schiffskoordinatensystem S_B gegenüber der X_B -Achse.

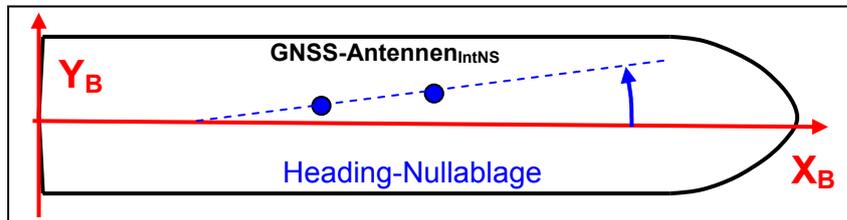


Abb. 9: Heading-Nullablage des integrierten Navigationssystems

Bei einem Kompass mit einer kompakten GNSS-Antennen-Einheit oder einem Kreiselkompass muss für die Bestimmung der Heading-Nullablage der Richtungswinkel der X_B -Achse gegen geographisch Nord bestimmt werden. Die Nullablage ergibt sich aus der Differenz des Richtungswinkels und dem Mittelwert des aufgezeichneten Azimuts des Sensors.

8 Risiken bei der Einmessung

In der Vergangenheit sind bei den Einmessungen immer wieder Fehler aufgetreten, die dazu führen können, dass die Anforderungen nicht erfüllt werden. Exemplarisch sollen hier die Fehler mit der höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit genannt werden:

- > Sensordaten während der Einmessung nicht aufgezeichnet
- > eingestellte Einbauwinkel und Nullablagen nicht auf Null gesetzt bzw. dokumentiert
- > erforderliche Verlängerungslatten nicht ausreichend
- > Schiff bewegt sich auf der Helling während der Einmessung
- > fehlerhafte Abstandsmessungen zur Wasserlinie
- > fehlerhafte Berechnungen (Vorzeichenfehler, Punktverwechslungen, ...)
- > fehlerhafte Eingabe der Einmessungsergebnisse in die Software und die Sensoren
- > ...

Wichtig im Sinne einer durchgreifenden Qualitätssicherung ist eine Prozessrisikoanalyse (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)), um mögliche Risiken rechtzeitig zu erkennen und diesen entsprechend entgegenzuwirken.

Da die Einmessung i. d. R. im Rahmen einer Vergabe durch ein Ingenieurbüro ausgeführt wird und hieraus durch den Gerätelieferanten die erforderlichen Eingabeparameter abgeleitet werden, ist eine durchgreifende Prüfung durch den Auftraggeber zwingend erforderlich.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die derzeit in der WSV angewendeten Arbeitsanweisungen für die Einmessung von Messsystemen werden den gestiegenen Anforderungen nicht mehr gerecht. Die BfG wird begleitend zu den derzeit laufenden Inbetriebnahmen der neuen Messsysteme der WSV neue Mess- und Berechnungsverfahren definieren, die sowohl im Binnenbereich als auch im Küstenbereich verwendet werden können.

Literatur

IHO (2008): International Hydrographic Organization Special Publication N° 44, Standards for Hydrographic Surveys, 5th Edition February 2008.

WIRTH, H. (2011): Messunsicherheiten in der Gewässervermessung, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht BfG-1734, Koblenz.



1989-1992

Studium Vermessungsingenieurwesen an der Fachhochschule Bochum

seit 1992

Vermessungstechnischer Mitarbeiter der Bundesanstalt für Gewässerkunde

Aufgaben:

Beratung der WSV-Dienststellen bei der Inbetriebnahme und Ausstattung hydrographischer Messschiffe

Mitarbeit bei der Entwicklung und Erprobung hydrographischer Mess- und Auswerteverfahren sowie Vermessungssysteme

Kontakt:

Thomas Brüggemann

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Am Mainzer Tor 1

56068 Koblenz

Tel.: 0261/ 1306 5228

Fax: 0261/ 1306 5302

E-Mail: brueggemann@bafg.de

Forschung und Entwicklung zum schiffserzeugten Sedimenttransport (SeST) im NOK und in der Elbe

Bernhard Kondziella, Volker Böder†, Andreas Prokoph und
Arne Sauer

1 Einleitung

Im Rahmen der Betrachtung des tidebedingten Sediment- und Schwebstofftransports in den Seeschifffahrtsstraßen und der zu beobachtenden verstärkten Sedimentation in den anliegenden Hafenanlagen der Ästuarie stellte sich die Frage, ob auch die Revierfahrt der größer werdenden Seeschiffe einen wesentlichen Beitrag zum residuellen Sedimenttransport leistet.

Die Beantwortung der Fragenstellung ist Ziel des in der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) laufenden Forschungs- und Entwicklungsprojekts zum Thema „Schiffserzeugter Sedimenttransport in Seeschifffahrtsstraßen“ (BAW 2011). Im Rahmen dieses auf den Zeitraum mehrerer Jahre ausgelegten Projekts sind u. a. umfangreiche Messkampagnen auf den Seeschifffahrtsstraßen Nord-Ostsee-Kanal (NOK) und Elbe vorgesehen.

Voruntersuchungen von BAW und der HafenCity Universität, HCU/NIAH fanden an der Elbe und am NOK statt (BÖDER et al. 2012a, 2012b). Erste umfassende Messungen wurden im September 2012 am NOK durchgeführt. Nachfolgend erfolgt ein Überblick der Ergebnisse mit einer Vorstellung der verwendeten Messtechnik und -methoden.

2 Methode

Die tidebeeinflussten Seeschifffahrtsstraßen zeichnen sich durch ein hochgradig gestörtes, turbulentes Strömungsumfeld aus. Es stellt eine komplexe Aufgabe dar, unter diesen Randbedingungen einen möglichen schiffserzeugten Sedimenttransport als signifikant zu detektieren.

Der NOK als Seeschifffahrtsstraße ohne Tideströmung, mit geringen Wasserspiegelschwankungen und einer Sohlbeschaffenheit mit Potenzial zur Suspension von Sedimenten bietet vereinfachte Randbedingungen zur Erprobung geeignet erscheinender Messverfahren und -methoden.

An dieser Wasserstraße war es möglich, sich zunächst darauf zu konzentrieren, die Wirkung der passierenden Seeschiffe unabhängig von der Tidedynamik zu betrachten. Ein besonderes Augenmerk bei der Wahl der Messtechnik galt hierbei der Kombination von verankerten, stationären Messsystemen und schiffsgestützten, akustischen Verfahren. Das Messgebiet (vgl. Abb. 1) lag im NOK bei km 18 südlich der Eisenbahnbrücke von Hochdonn (UTM 32519358, 5984591).



Abb. 1: Lage des Messquerschnittes im NOK bei km 18 (Quelle: www.bkg.bund.de)

Eine prinzipielle Darstellung der Geschehnisse in der Wassersäule bei Passage eines Seeschiffes findet sich in Abb. 2: Während der Passage kommt es aufgrund der Verdrängung des Wasserkörpers zu einem Absinken des Ruhewasserspiegels (RWS), dem Absink. Am Schiffsrumpf bilden sich Wellensysteme, die sich bis in die Uferzone ausbreiten können. Dabei kommt es zu Wechselwirkungen mit der Gewässersohle und daraus resultierenden möglichen Auswirkungen auf den Schwebstoffgehalt der Wassersäule. Nach der Passage stellt sich erneut der RWS ein. Ziel der Messungen ist es, geeignete Technik zusammenzustellen, um diese Geschehnisse erfassen und bewerten zu können.

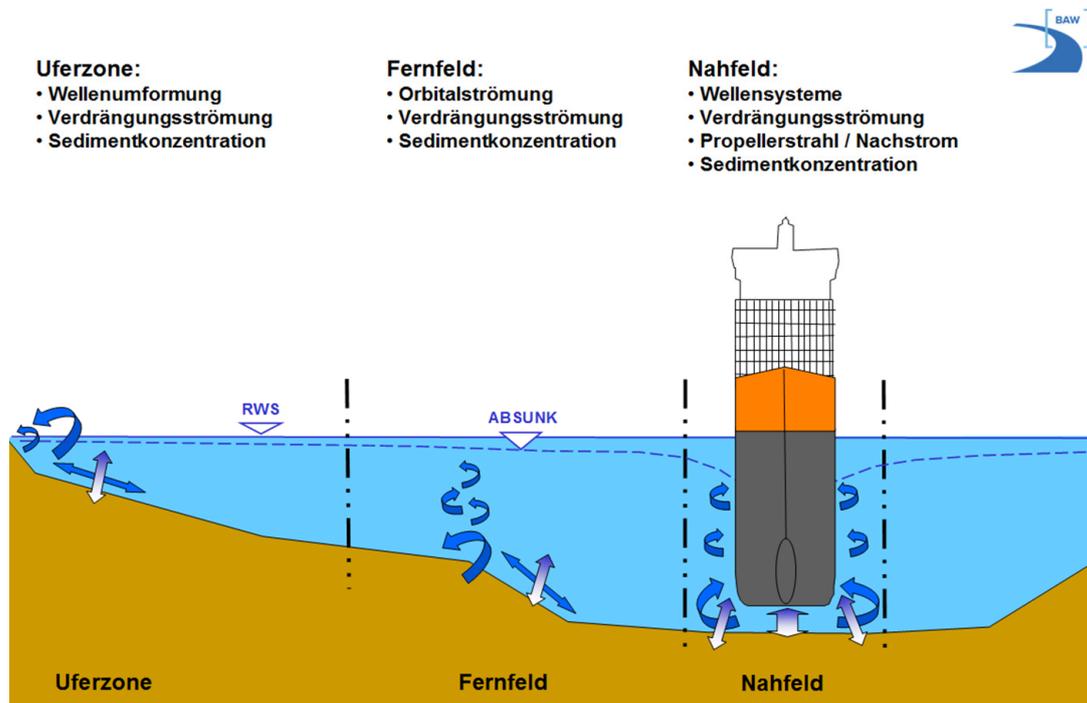


Abb. 2: Einfluss passierender Seeschiffe auf eine Wasserstraße mit möglichen Auswirkungen bis in den Uferbereich

2.1 Stationäre Messungen

Ziel der Untersuchung war es, auch kurzzeitige Trübungsänderungen und deren Ursache zu erfassen. Die Wahl fiel auf den Einsatz zeitlich hoch auflösender Trübungssensoren, Wasserstandssensoren und Strömungssensoren. Zum Einsatz kamen Multiparametersonden vom Typ *Midas+* der Fa. Valeport/UK und *Vector*-Strömungssonden der Fa. Nortek/NOR. Die Ausstattung der *Midas+* bestand aus CTD-Sensoren sowie optischen Trübungssensoren vom Typ STM (*Seapoint Turbidity Meter*). Deren maximal nutzbare Abtastrate lag bei 8 Hz. Die *Vector*-Sonden erlauben punktuelle, dreidimensionale Strömungsmessungen auf akustischer Basis mit bis zu 64 Hz Abtastrate, um auch turbulente Strömungsanteile detektieren zu können. Im Hinblick auf die Länge des geplanten Messzeitraumes und die verminderte Lebensdauer der Batterien bei Wahl der maximalen Abtastrate erfolgte die Messung mit 32 Hz.

Alle Messsysteme liefen in einem autarken Modus, d. h. die Energieversorgung erfolgte über interne Batterien und die Daten wurden in internen Speichern abgelegt. Der Start der Messwerterfassung erfolgte zeitgesteuert und wurde zuvor über die Gerätesoftware festgelegt.

Sowohl das System *Midas+*, als auch *Vector* waren mit Drucksensoren ausgestattet, was eine nachträgliche Synchronisierung der Datenreihe über die Signale in der Wasserspiegelauslenkung ermöglichte.

Im Vorfeld der Messung wurden drei identisch bestückte Verankerungen auf dem Grund der Fahrrinne ausgebracht. Dies erfolgte durch Taucher des Wasser- und Schifffahrtsamtes (WSA) Brunsbüttel. Die Sondenpositionen bildeten eine Linie senkrecht zur Längsachse des Kanals. Die stationären Messungen fanden in der Zeit vom 17.9.2012, 10:00 Uhr bis 25.9.2012, 12:00 Uhr MESZ statt.



Abb. 3: Ankerstein mit *Midas+* und *Vector*-Sonde vor Installation auf der Gewässersohle

2.2 Schiffsgestützte Messungen

Die in Punkt 2.1. beschriebenen stationären Messungen erlaubten zeitlich hochaufgelöste Punktmessungen der Ereignisse. Die abgeleiteten Aussagen haben aber nur eine räumlich eingeschränkte Gültigkeit. Um nun auch Aussagen zu den Geschehnissen in der Wassersäule zu erhalten, fanden parallel in der Zeit vom 18.-20.9.2012 schiffsgestützte Messungen statt.

2.2.1 *Suspended sediment concentration (ssc) mit ADCP/PDT*

Die flächenhafte Erfassung des Schwebstoffgehaltes in der Wassersäule mittels schiffsge-
stütztem Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) ist ein in Tidegewässern erprobtes aku-
stisches Verfahren (MAUSHAKE 2007, VAN SANTEN & MOL 2011). Dabei quert das messende
Schiff die Wasserstraße zwischen den Ufern mit möglichst konstanter Geschwindigkeit. Die
aufgezeichneten akustischen Rückstreusignale des ADCP erlauben einen Rückschluss auf
den verursachenden Schwebstoffgehalt des Wassers in den einzelnen Tiefenzellen. Dies er-
folgt über die Kalibrierung mit den während der Messkampagne entnommenen Wasserpro-
ben. Zur möglichst ungestörten Erfassung der Konzentration nahe der Sohle wurde ein zwei-
tes, um 20° geneigtes ADCP eingesetzt. Aufgrund dieser Anordnung kann eine senkrecht auf
die Sohle auftreffende Schallkeule zur Schwebstoffbestimmung verwendet werden. Die Pa-
rametereinstellung des ADCP erbrachte eine Ausdehnung der einzelnen Tiefenzellen auf
50 cm. Bei einer Wassertiefe von rd. 11 m ergeben sich für 22 Tiefenzellen Informationen
über den Schwebstoffgehalt. Das mehrmalige Queren der Wasserstraße zeigt die zeitliche
Entwicklung der Schwebstoffkonzentrationen im Gewässerquerschnitt. Die Dauer einer ein-
zelnen Querung betrug rund eine Minute. Die Messungen und Auswertungen der aktuellen
Untersuchungen wurden von der niederländischen Firma AquaVision im Auftrag der BAW
vorgenommen.



Abb. 4: Messschiff „NARWAL“ mit zwei ADCP-Sensoren bei Messungen vor der Passage eines Schiffskonvois

2.2.2 *Akustisches Rückstreusignal eines Sedimentecholotes (SES)*

Parallel zur ADCP-Messung wurde phasenweise ein Sedimentecholot (SES 2000 der Fa. Innomar) zur Erfassung akustischer Rückstreusignale aus der Wassersäule eingesetzt. Das Gerät erreicht deutlich größere räumliche und zeitliche Auflösungen als das ADCP. Das bei

den ADCP-Messungen erprobte und eingeführte Verfahren zur Umrechnung der Rückstreuungssignale zum Schwebstoffgehalt gibt es beim SES allerdings noch nicht, und ein solches Verfahren ist hier noch zu entwickeln. Ergebnisse der SES-Messungen sind bisher nur akustische Signaturen im Anschluss an Passagen von Seeschiffen in ihrer zeitlichen Entwicklung, deren Darstellung nur einen visuellen Eindruck der Wirkung vermittelt. Sie erlauben aber noch keine Aussagen zum Schwebstoffgehalt der Wassersäule.

2.2.3 Tiefenprofilmessung der Trübung mittels CTD/OBS

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Voruntersuchungen zeigten, dass unmittelbar hinter dem Heck eines passierenden Schiffes häufig Störsignale auftreten, die eine Messung des Schwebstoffgehaltes mit akustischen Verfahren erschweren oder gar unmöglich machen. Als mögliche Ursache ist hier der Einschluss größerer Luftblasen zu nennen, welche die akustischen Signale schwächen. Um die entstehende Wissenslücke hinsichtlich des Schwebstoffgehaltes zu schließen, wurde parallel mit dem Schiff „Brandgans“ des WSA Brunsbüttel ein zweites Messschiff eingesetzt. Mit Hilfe des Bordkranes und einer Multiparametersonde (*Midas+* der Fa. Valeport) sollten unmittelbar nach Passage eines Seeschiffes kontinuierlich Fierprofile der Trübung über einen längeren Zeitraum erfasst werden. Bei dieser Einsatzform der *Midas+* ist es möglich, die Messdaten schon während der Erfassung auf dem Monitor zu betrachten und damit schon eine erste Bewertung durchzuführen. Ziel war es, die zeitliche und räumliche Entwicklung der Trübung zu bestimmen.

2.3 Weitere Begleitdaten

Zur Einordnung der Messdaten der einzelnen verwendeten Sensoren in ein Gesamtbild diente die Erfassung des Schiffsverkehrs mittels des *Automatic Identification System* (AIS). Zu diesem Zweck wurde für den Zeitraum der Messungen auf der benachbarten Eisenbahnbrücke ein AIS-Empfänger installiert, dessen Daten auf einem PC abgespeichert wurden. Das aufgezeichnete AIS-Signal enthält verschiedene Informationen zu den einzelnen Seeschiffen, wie z. B. Schiffsname, Länge, Breite, Tiefgang, Schiffgeschwindigkeit über Grund sowie Position des Schiffes in geographischen Koordinaten. Die Zeitinformation ist nicht Bestandteil des AIS-Signals und wurde aus dem Empfangs-PC beigesteuert. Zur präzisen Positionsbestimmung der schiffsgestützten Messwerte (ADCP, SES, *Midas+* Fierprofile, ...) wurden RTK-GNSS-Messungen (*Real-Time Kinematik - Global Navigation Satellite System*) durchgeführt. Informationen über die aktuelle Unterwassertopographie lieferte die von der HCU/NIAH mit dem Messschiff Level A durchgeführte Fächerecholotpeilung (BÖDER et al. 2012b).

3 Ergebnisse

3.1 Stationäre Messungen

Im Messzeitraum wurden insgesamt 509 passierende Schiffe erfasst. Überwiegend kam es dabei aufgrund der Verkehrssituation im NOK zu Fahrten im Konvoi. Der geringste zeitliche Abstand zweier Passagen lag bei zwei Minuten, der größte Abstand bei 140 Minuten, wobei der Schwerpunkt aufgrund der häufigen Konvoifahrten bei kurzen Zeitabständen lag. Ein Drittel der Passagen fand mit einem zeitlichen Abstand zum Vorgängerschiff von weniger als fünf Minuten statt. Die Passagen einzelner Schiffe ergaben Absunkwerte des Wasserspiegels von bis zu 1 m und maximale Werte der Rückströmung von 1,5 m/s.

Abbildung 5 stellt ein Beispiel für die Entwicklung der Trübung in Sohlhöhe bei Passage eines Konvois aus zwei Schiffen dar. In diesem Fall kommt es zu einem Anstieg der Trübung, der hier bereits nach etwa einer Minute abgeklungen ist.

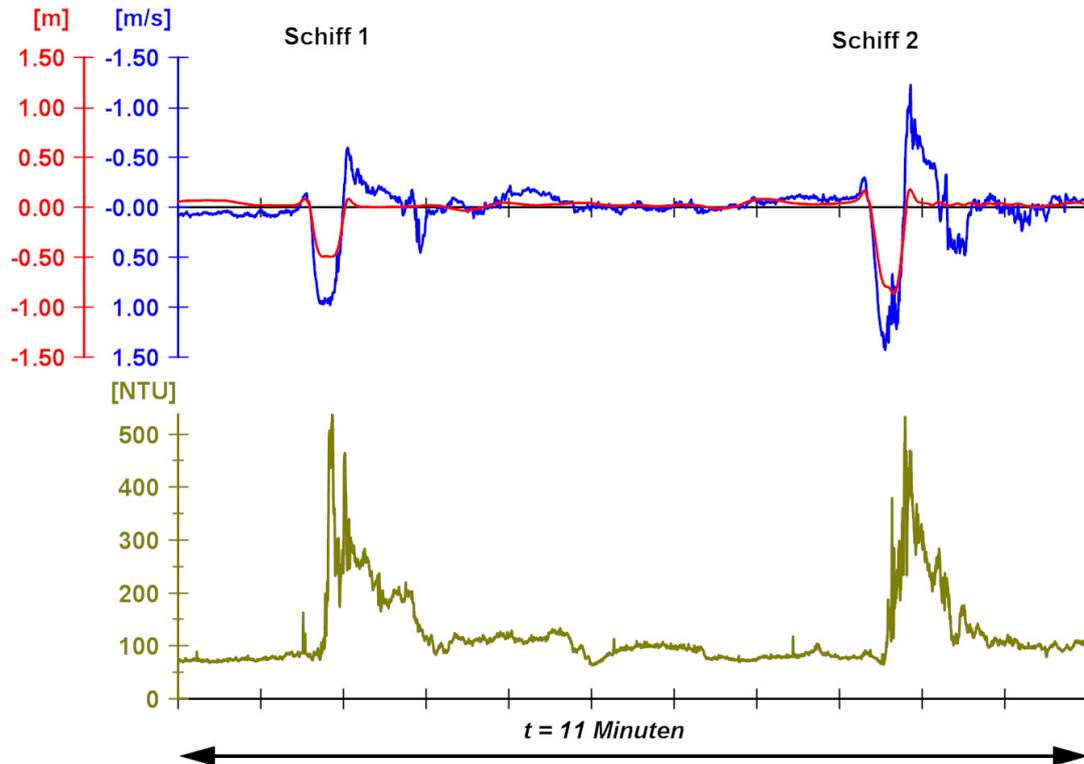


Abb. 5: Beispiel einer Passage zweier Seeschiffe in kurzer zeitlicher Abfolge mit Darstellung der Wasserspielauslenkung und Rückströmung (oben) sowie der resultierenden Trübungsentwicklung an der Gewässersohle in der Mitte der Fahrrinne (unten).

3.2 Schiffsgestützte Messungen

Während der ADCP-Messungen erfolgte die Entnahme von 120 Wasserproben, die zeitnah im Labor auf ihre Schwebstoffkonzentration hin analysiert wurden. Der Maximalwert lag bei 120 mg/l, das Minimum bei 37 mg/l. Die Probenergebnisse erlauben eine Umrechnung der gemessenen akustischen Rückstreuungssignale auf den ursächlichen Schwebstoffgehalt in der Wassersäule mittels inverser Normierung und Kalibrierung des akustischen Backscatters (u. a. DEINES 1999, URICK 1983). Die Darstellung der ADCP-Messungen der einzelnen Querprofile zeigt deutlich die zeitliche Entwicklung der Trübung in Querschnitt der Wassersäule auf. Abbildung 6 fasst die Messungen vor und nach Passage eines größeren Seeschiffes zusammen. Eine typische zeitliche Abfolge der Fierprofile dabei zeigt Abb. 7. In Folge einer Schiffspassage ist die Zunahme der Trübung in der gesamten Wassersäule erkennbar, wobei die höchsten Werte im Bereich der Gewässersohle gemessen wurden.

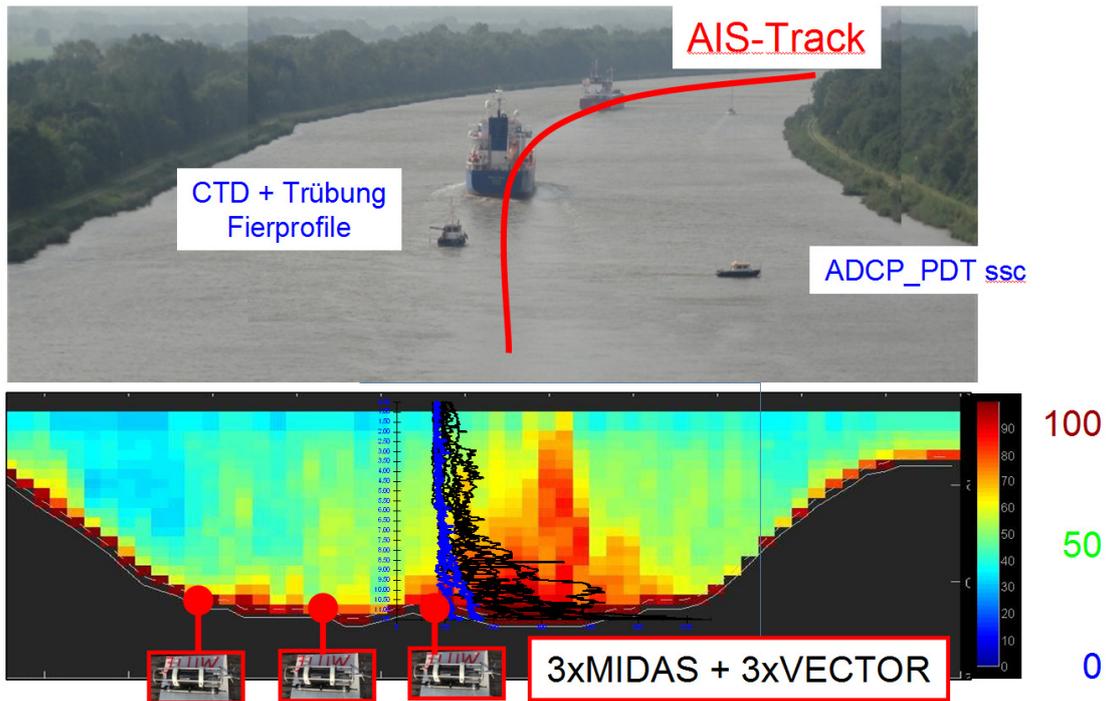


Abb. 6: Zusammenfassende Darstellung der Messergebnisse der unterschiedlichen Sensoren nach Passage eines Seeschiffes

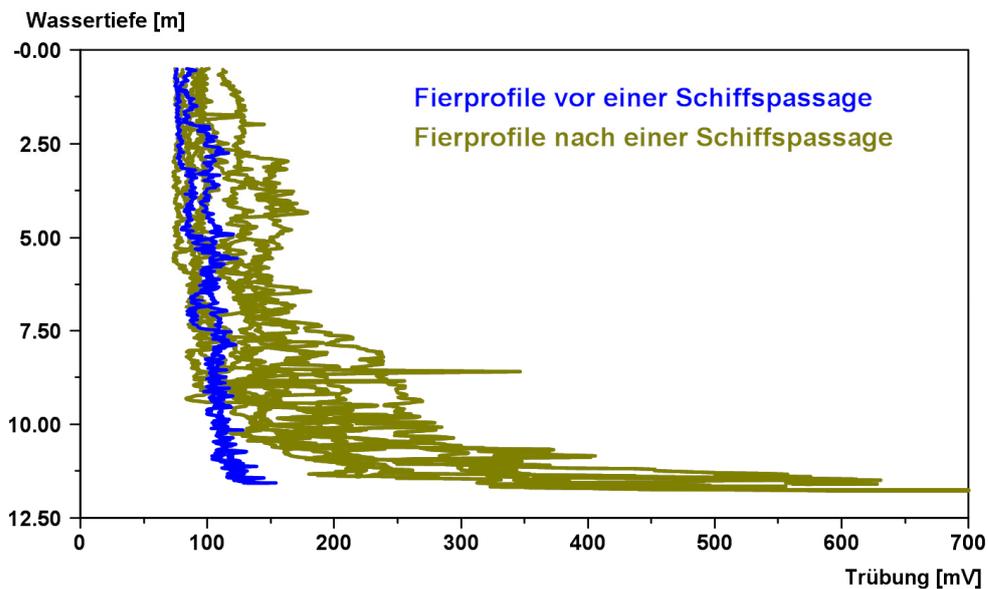


Abb. 6: Darstellung einer Schar Tiefenprofile der Trübung vor und nach der Passage eines Seeschiffes

4 Ausblick

Nach den ersten Messungen im NOK erfolgt derzeit die intensive Aus- und Bewertung der erfassten Daten. Im Anschluss ist es vorgesehen, mit den dann gewonnenen Erkenntnissen die nächsten Messungen in der Elbe durchzuführen. Dort kommen dann mit der Tide deutlich erschwerte Umgebungsbedingungen hinzu.

Literatur

- BAW (2011): Schiffserzeugter Sedimenttransport (SeST). Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2011, S. 258-261, Internet, Stand 27.02.2013):
http://www.baw.de/dokumente/pdf/baw/Forschungskompodium_2011.pdf
- BÖDER, V., A. PROKOPH & A. SAUER (2012a): Erfassung des Gewässerbetts und von Sedimenten auf der Unterelbe bei Wedel mit hydroakustischen Methoden. Messbericht (unveröffentlicht)
- BÖDER, V., A. PROKOPH & A. SAUER (2012b): Erfassung des Gewässerbetts und von Sedimenten im Nordostseekanal (NOK) mit hydroakustischen Methoden. Messbericht (unveröffentlicht).
- DEINES, K. L. (1999). Backscatter estimation using broadband acoustic doppler current profilers. Oceans 99 MTS/IEEE Conference Proceedings. San Diego.
- MAUSHAKE, C. (2007): Untersuchungen zur Schwebstoffdynamik im Elbeästuar auf Basis von ADCP-Messungen. „Die Küste“, Heft 72
- URICK, R. J. (1983): Principles of Underwater Sound, Third Edition, McGraw-Hill, New York
- VAN SANTEN, P. & J.-W. MOL (2011): Sediment and hydrodynamic measurements in the German estuaries, 2006-2011. AquaVision Messbericht AV_DOC_110023

...

Kontakt:

Dipl.-Ing. (FH)

Bernhard Kondziella

Bundesanstalt für Wasserbau

Wedeler Landstr. 157

22559 Hamburg

Tel.: 040/ 819 08 354

E-Mail:

Bernhard.Kondziella@baw.de

Jahrgang: 1969

1991-2007

Studium Physikalische Technik an der FH Wedel

seit 2007

Technischer Angestellter der Bundesanstalt für
Wasserbau, Dienststelle Hamburg

Projektbearbeitung:

Konzeptionierung, Durchführung und Auswertung
von Messungen zum Themenschwerpunkt „Wech-
selwirkung zwischen Seeschiff und Seeschiffahrts-
straße“. Die Messungen finden sowohl in Physika-
lischen Modellen als auch in der Natur statt.

Kontakt:

M. Sc. Andreas Prokoph

HCU NIAH Forschung-

Weiterbildung-Service GmbH

Hebebrandstr. 1

22297 Hamburg

Tel.: 040/ 42827 5314

E-Mail:

Andreas.prokoph@hcu-hamburg.de

Jahrgang: 1984

2004-2006

Universität Regensburg

Studium der Rechtswissenschaften sowie Ostwis-
senschaftliches Begleitstudium

2006-2009

Fachhochschule Kärnten

Studium der Geoinformationwissenschaften

2009-2012

HafenCity Universität Hamburg

Masterstudiengang Geomatik und Hydrographie

Wissenschaftliche Hilfskraft am GEOMAR und
Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresfor-
schung

Seit 2012

HCU NIAH GmbH

Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Hydro-
graphie

Die Entwicklung der hydrographischen Auswertesoftware (PAUSS) für die WSV

Heinz-Erich Rader

1 Einleitung

Das Programmsystem PAUSS soll, laut Lastenheft zur Ausschreibung, das einheitliche Peil-auswertesystem, auch als Postprocessing Tool bezeichnet, für die Auswertung der Daten der Gewässervermessung einschließlich Produkterstellung und Weiterverarbeitung für die gesamte Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) werden.

2 Ausgangssituation

Zum Zeitpunkt der Ausschreibung des Programmsystems PAUSS und auch noch heute gab bzw. gibt es zwei Programmsysteme, die innerhalb der WSV zur Auswertung von Peildaten und bautechnischen Abrechnungen eingesetzt werden. Das eine trägt den Namen TIMPAN, das andere heißt Hydap.

2.1 TIMPAN

Bei dieser Software handelt es sich um ein schon etwas älteres Programmsystem, das jedoch immer wieder erneuert wurde. Mit der Software werden im Wesentlichen Daten von Einzel- und Mehrschwingersystemen ausgewertet. Weiter wird sie dazu verwendet, bautechnische Abrechnungen, insbesondere Massenberechnungen nach Querprofilen, durchzuführen.

Die Oberfläche dieser datenbankbasierten Software ist allerdings inzwischen in die Jahre gekommen, so dass die WSV einen Ersatz für diese Software ausschrieb, mit gleicher rechnerischer Funktionalität, jedoch moderner Mensch-Maschine-Schnittstelle.

2.2 Hydap

Diese Software ist, im Gegensatz zu TIMPAN, File-basiert, d. h. die Daten werden nicht in einer Datenbank gehalten, sondern alles Notwendige wird in Dateien abgespeichert. Das Programm verfügt jedoch über umfangreiche Auswerte- und Plausibilisierungsalgorithmen für die Bearbeitung von Peildaten, hier insbesondere von Daten, die mit Fächerecholotsystemen erfasst wurden. Für diese Art der Vermessung ist es der de facto Standard in der WSV. Die Oberfläche ist modern, so dass es auch in den nächsten Jahren noch eingesetzt werden könnte.

2.3 Aufgaben global

Der Wunsch des WSV bestand nun darin, ein einheitliches Programmsystem zu erhalten, das, basierend auf den Funktionen der bereits im Einsatz befindlichen, alles in einer Einheit dem Benutzer anbieten sollte. Sie sollte als Client-Server-Kombination einsetzbar sein und die Datenhaltung sollte in Datenbanken erfolgen. Die zu erstellende Software sollte in die Systemlandschaft der WSV passen, also z. B. auf Windows aufsetzen, und die Oberfläche sollte aktuellen Anforderungen genügen und zukunftssicher sein.

Im groben Überblick sollten folgende Funktionen enthalten sein:

- > Import von Peildaten (Primärdaten) aus Linien- und Flächensystemen, Befliegungsdaten und Sach- und Bestandsdaten sowie Laden aus der Arbeitsdatenbank
- > Plausibilisierung der Daten
- > Modellbildung und Ableitung von Daten (z. B. Profile, Tiefenlinien, etc.)
- > Produkterstellung (Karten, Tiefenschichtlinien, Volumenberechnungen usw.)
- > Speicherung der digitalen Ergebnisse von PAUSS in der Arbeitsdatenbank
- > Langzeitarchivierung im 3D-Archiv
- > bautechnische Auswertungen sowie Auswerteprozesse des Geschiebemanagements wie Volumen- und Flächenberechnungen

3 Ausschreibung und Vergabe

Mit diesen im Lastenheft formulierten Zielen wurde die Ausschreibung durchgeführt. Den Zuschlag erhielt die RMR Softwareentwicklungsgesellschaft aus Bad Neuenahr-Ahrweiler.

3.1 Vergabegründe

Die RMR ist die Verfasserin der Software GeoCAD-OP. Sie, und darin waren sich der Auftraggeber und der Auftragnehmer einig, beinhaltete schon viele Funktionalitäten der zu erstellenden Software, so dass GeoCAD-OP als Basis für die darauf aufbauende Erstellung von PAUSS dienen konnte. Sie sollte also nur angepasst und erweitert werden. Nur dadurch war der angebotene Preis sachgerecht.

3.2 Kurzbeschreibung der vorhandenen Software GeoCAD-OP

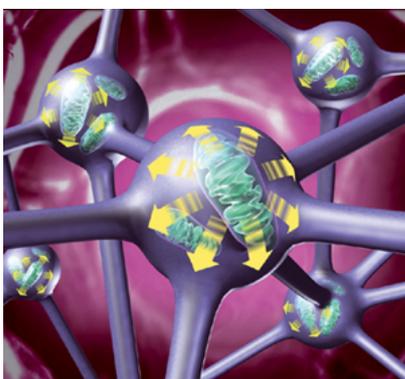


Abb. 1: Zelle

Zum Zeitpunkt der Ausschreibung bestand die Software aus rein objektorientierten C++-Programmen mit dem Ziel, die Datenhaltung und Verknüpfung der Daten untereinander möglichst flexibel zu halten, um sich nicht in den bekannten Nachteilen der relationalen oder objektpersistenten Datenhaltung zu verfangen. Weiter wurde in der Software das Ziel verfolgt, die Zugriffe möglichst schnell zu halten, über die Zeit insgesamt gesehen. Die Datenhaltung war so gestaltet, dass beliebige Objekte miteinander verknüpft werden konnten, ohne Voreinstellungen durch eine Datenbankstruktur. Dies ist verwirklicht durch ein Konzept, in dem eine Zelle (s. Abb. 1) die

Objektinhalte einbettet und jedes Objekt andere Objekte referenzieren bzw. von anderen referenziert werden kann. Jedes Objekt kennt die Objekte, mit denen es verknüpft ist und diejenigen, von denen es referenziert wird. Da jedes Objekt über eine eindeutige Identifizierung verfügt, mit der zu jeder Zeit festgestellt werden kann, auf welcher Maschine wann welches Objekt entstanden ist, wird auch die Referenzierung umkehrbar eindeutig.

Nachfolgend wurden im Vortrag einige der Basisobjekte der Software vorgestellt, benanntes und unbenanntes Objekt, die Bedeutungskataloge, die den Objekten ihren Sinn geben oder Verknüpfungsobjekte, die die Berechnungen überwachen. Dies alles wirkt jedoch nur zusammen mit den nachfolgend vorgestellten einzelnen Modulen der Software.

3.3 Komponenten der Software

Wie der Abb. 2 zu entnehmen ist, besteht die Software aus den dort aufgeführten Komponenten. Die Basis für alle Arbeiten bildet die integrierte Datenbank. Als Schale darüber befindet sich eine Programmschicht, die Virtualisierung, die bei bestimmten Anwendungen (z. B. großen digitalen Geländemodellen) die Objekte im Hintergrund zerlegt, so dass die sie verarbeitenden Rechner sich daran im RAM nicht übernehmen.

Darauf setzt der sehr schnelle auf OpenGL basierende 3D-Viewer auf. Ebenfalls benutzt die Rasterdatenverarbeitung diesen Mechanismus, um z. B. große digitale Rasterkartenwerke in entsprechend guter Geschwindigkeit anzeigen und verwalten zu können.

Die interne CAD ist ein Spezialfall der Dialoge, die die Schnittstelle zum Anwender bilden. Allen Komponenten stehen die verschiedensten Rechenalgorithmen zur Verfügung. Sie sind nicht auf ein Modul beschränkt.

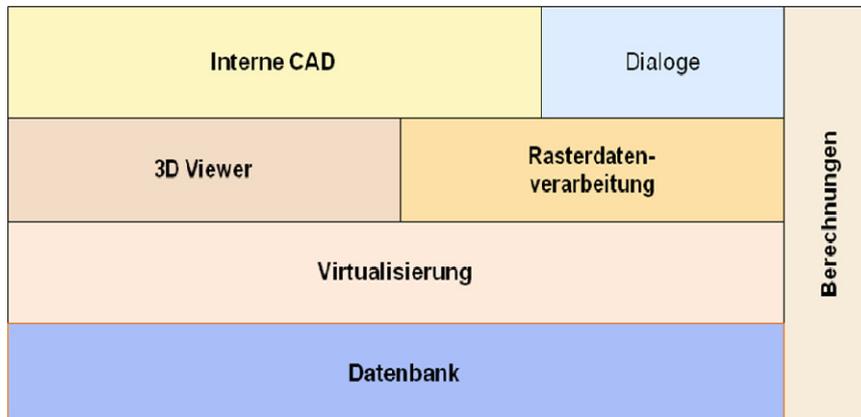


Abb. 2: Komponenten der Software GeoCAD-OP

3.3.1 Virtualisierung

Dieser Teil der Software zerlegt, wie bereits zuvor erwähnt, große Objekte im Hintergrund in einzelne, kompaktere Einheiten, so dass die Fähigkeiten eines einzelnen Rechners nicht überschritten werden. Für den Benutzer stellt er sie dennoch als ein großes Ganzes dar. Dies wird durch Algorithmen, wie dynamische Quad- oder Octrees innerhalb der Datenbank erreicht. Derzeit werden diese Zerlegungen für Rasterdaten, digitale Geländemodelle und CAD-Zeichnungen (Kartenwerke) durchgeführt.

3.3.2 Integrierte CAD

Es handelt sich bei diesem Teil der Software um einen AutoCAD-Clone, der AutoCAD-DWG-Dateien einlesen und schreiben kann, und der völlig analog zum Original über vom Benutzer anpassbare Menüs und Werkzeugkästen verfügt. Er kann 2D- und 3D-Zeichnungen verarbeiten und sowohl die Formate DWG und DXF als auch DGN und SHP einlesen und schreiben. Im Unterschied zum Original baut die Zeichnungsdarstellung jedoch auf einer digitalen Zeichenvorschrift auf und alle Geometrien sind auch in der Arbeitsdatenbank gespeichert. Aufgrund der digitalen Zeichenvorschrift können sie dann in der festgelegten Präsentationsausgestaltung am Schirm bzw. im Plot dargestellt und bearbeitet werden. Änderungen in der CAD führen zu einer Fortführung der Datenbankelemente und umgekehrt. Innerhalb der CAD sind auch Berechnungen, Konstruktionen usw. möglich. Es können Rasterdaten und Kartenwerke hinterlegt werden. Auch das Einfügen von 3D-Modellen (einzeln oder als Kartenwerke) ist möglich. Da es sich um ein Wysiwyg-Werkzeug handelt, sind die Plots identisch mit den Ansichten am Schirm. Zusätzlich zu den genannten CAD-Formaten sind Daten im EDBS- und NAS-Format einles- und ausgabbar.

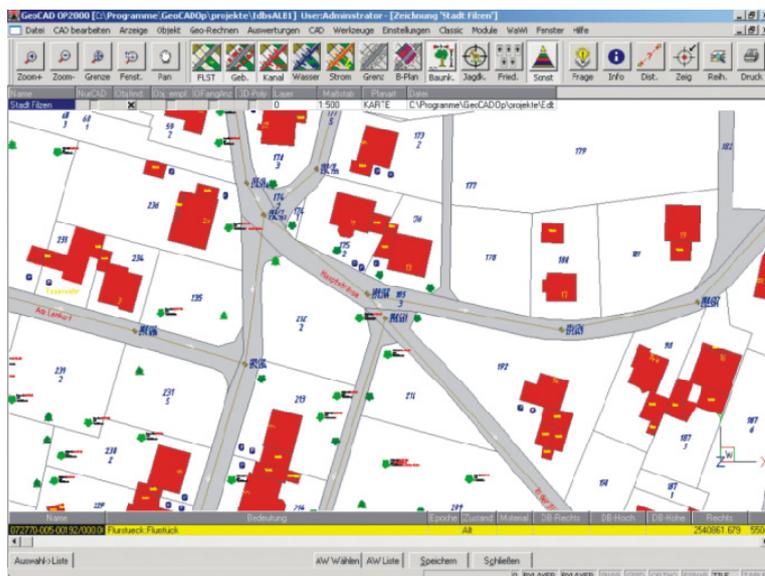


Abb. 3:
CAD-Beispielzeichnung

3.3.3 3D-Viewer und DGN

Diese Softwarekomponente ist für die sehr schnelle 3D-Anzeige von digitalen Geländemodellen oder vergleichbaren Daten vorgesehen. Sie basiert auf OpenGL und kann zusammen mit Rasterdaten in die CAD eingeblendet werden oder in einem eigenen Viewer Anzeigen vornehmen. Sie ist die Basis des Handlings der digitalen Geländemodelle (DGM). Die DGM sind ihrerseits wieder die Basis für Massenberechnungen, Geländeschnitte, Überflüge in Real-Time in den Modellen und sollen dies auch für die Auswertung der Peildaten werden, da dort große Punktwolken anfallen. In dieser Komponente stehen auch Ausdünnungsalgorithmen, die parallelisierbar sind, zur Verfügung. Nach dem Durchlauf der Daten durch diese Algorithmen können sie in Quasi-Echtzeit in diesem Viewer angesehen werden. Beispiele für 3D-Ansichten und Schnitte sind in Abb. 4 und 5 zu sehen.

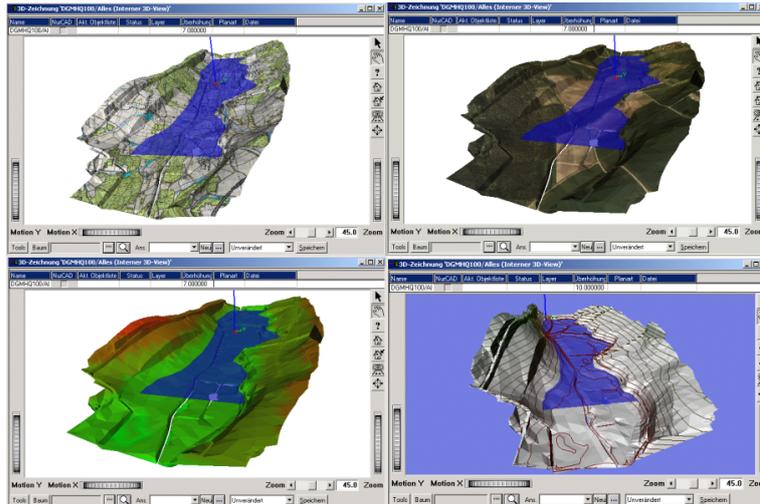


Abb. 4:
Beispielansichten 3D-Viewer

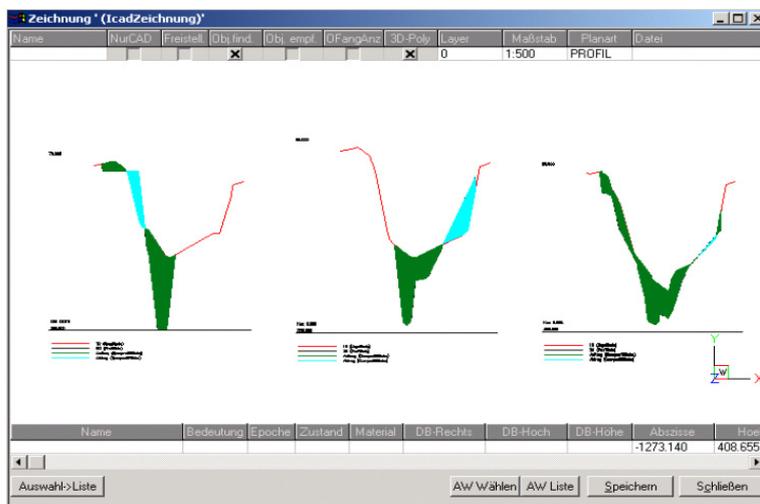


Abb. 5:
Schnittdarstellungen

3.3.4 Berechnungsmodul

In diesem Teil der Software befinden sich alle geodätischen Berechnungen. Dazu gehören auch die Koordinatentransformationen wie 2D-kartesisch, 3D-kartesisch, inklusive geschlossener 3D-Transformation ohne Iterationen und Ellipsoid-basierte (geographisch, Datumstransformation, spezielle Transformationsmodule der Bundesländer). Daneben können verschiedenste Messgeräte, wie GPS-Empfänger, Tachymeter, Echolote, Scanner (2D, 3D) oder Analog-Digital-Wandler direkt an dieses Modul angeschlossen werden. Die Auswertungen erfolgen direkt online in dem angeschlossenen Rechner und die Daten werden aus dem Berechnungspaket an die übrigen Anzeigen, wie die CAD oder den 3D-Viewer, weitergeleitet. Zu den physischen Schnittstellen, die bedient werden können, gehören RS 232, Ethernet, Bluetooth, Profi- und CAN-Bus.

3.4 Das Auftragsverständnis auf Seiten des Auftragnehmers

Während der Entscheidungsfindung waren sowohl der Auftraggeber als auch der Auftragnehmer der Meinung, dass auf Basis der vorhandenen Software GeoCAD-OP durch Anpassung das gewünschte Programmpaket PAUSS entstehen könnte. Die Anpassungen

sollten ausreichen, um die Pakete TIMPAN und Hydap abzulösen und durch eine modernere Version von GeoCAD-OP zu ersetzen. Auf dieser Basis wurde die Preisfindung durchgeführt und vom Auftraggeber akzeptiert.

Die an der vorhandenen Software notwendigen Änderungen wurden im Pflichtenheft beschrieben. Dies waren im Wesentlichen folgende Punkte:

- > Einführung des Ordnungssystems der Bundeswasserstraßen (entweder mittels Stammprofilen oder Achsen)
- > Programmierung der Schnittstellen zu den zahlreichen Formaten der WSV
- > Datenbankanpassung im Wesentlichen um das Objekt „Messfahrt“
- > Übernahme der hydrographischen Auswerteberechnungen aus Hydap
- > WPF-GUI erstellen
- > ENC-Schnittstelle schließen
- > REB- und GAEB bzw. bautechnische Berechnungen komplettieren

Insbesondere ging die Auftragnehmerseite davon aus, dass eine Anpassung eben auch beinhaltet, dass die Auftragnehmerseite und ihre Mitarbeiter die Gegebenheiten der bereits vorhandenen Software akzeptierten, da sonst eine Anpassung des Vorhandenen allein nicht ausreichen würde.

3.5 Das Auftragsverständnis auf Seiten des Auftraggebers

Nachdem die Schnittstellen bis auf einige wenige programmiert und dem Auftraggeber vorgestellt worden waren, stellte dieser fest, dass man sich in den Oberflächen und dem Vorgehen innerhalb der Software „nicht wiederfinde“. Es müssten nicht nur die Arbeitsabläufe, sondern auch die Begrifflichkeiten der Auftraggeberseite in die Software mehr eingehen. Davon könne man auch nicht abgehen. Damit war auch klar, dass die Ausgangslage, die vorhandene Software nur noch anzupassen, nicht mehr gegeben war. Es mussten umfangreiche Umprogrammierungen begonnen werden. Als Konsequenz daraus ergaben sich auch immer wieder auftretende Verschiebungen der Zeitpunkte der Fertigstellungen von Zwischenschritten.

Um dies überhaupt erreichen zu können und auch noch weiter die Möglichkeit zu haben, die Software als ein nicht „PAUSS“-System zu betreiben, mussten nicht nur die Datenbank angepasst werden, sondern es mussten bzw. müssen alle Menüs, alle Anzeigen, die Bedeutungen der Objekte und die Ausgaben parametrierbar gemacht werden. Diese Arbeiten gehen weit über die Anpassung einer Software um eine rein funktionale Erweiterung hinaus.

3.6 Notwendige Änderungen

Die aufgrund der Erfahrungen mit dem Auftraggeber als notwendig erkannten Änderungen betrafen vor allem die WPF-Oberfläche, die Datenbank, die Filterung der Daten und die Verteilung der Daten auf verschiedene am Prozess beteiligte Rechner.

3.6.1 Änderungen an der WPF-Oberfläche

Die vorhandene Oberfläche sollte durch ein WPF(Windows Präsentation Foundation)-basiertes User-Interface ersetzt werden. Da sich WPF ohne größere Umstände nur mit C# ansprechen lässt, wurde für PAUSS ein zweiter Prozeß in der Software aufgesetzt, der das User-Interface beinhaltet und mit dem Kern der vorhandenen Software kommuniziert (s. Abb.). Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass eine Multithread-fähige Interprozesskommunikation kein einfaches Unterfangen darstellt. Dieses gesamte Framework musste zunächst einmal erstellt werden und führt(e) auf dem Weg zur funktionalen Anwendung nicht zu irgendwelchen sichtbaren Fortschritten.

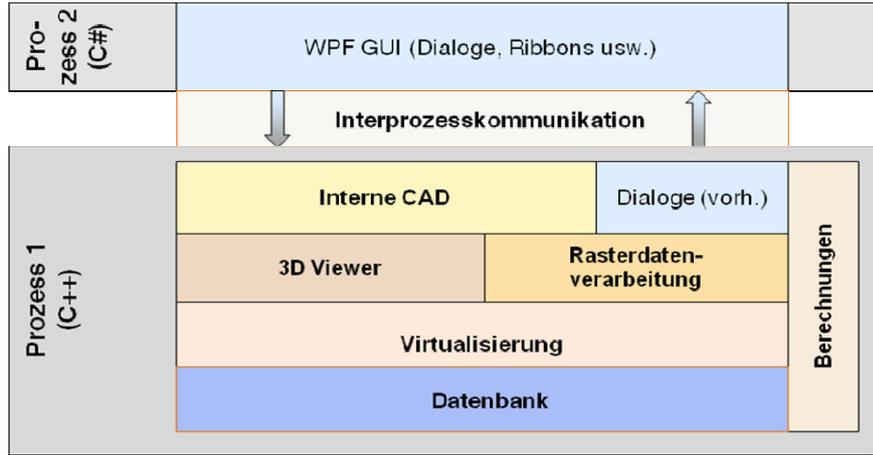


Abb. 6: Softwarekomponenten nach der Überarbeitung

Wie bereits weiter oben erwähnt, müssen auch alle Anzeigeelemente einstellbar sein (vgl. Abb. 7). Dazu gehören die Filtereinstellungen des Objektbrowsers, die Ribbon-Menüs, die Werkzeugkästen sowie die Bezeichnungen der angezeigten Objekte. Ohne dieses aufwendige und langwierige Vorgehen, wäre es dem Auftragnehmer nicht möglich, die Software auch noch an andere Kunden, die nicht hydrographische Auswertungen damit vornehmen wollten, abzugeben. Diese Notwendigkeit war aber immer als vorgegeben bekannt und entsprechend war das Angebot kalkuliert.

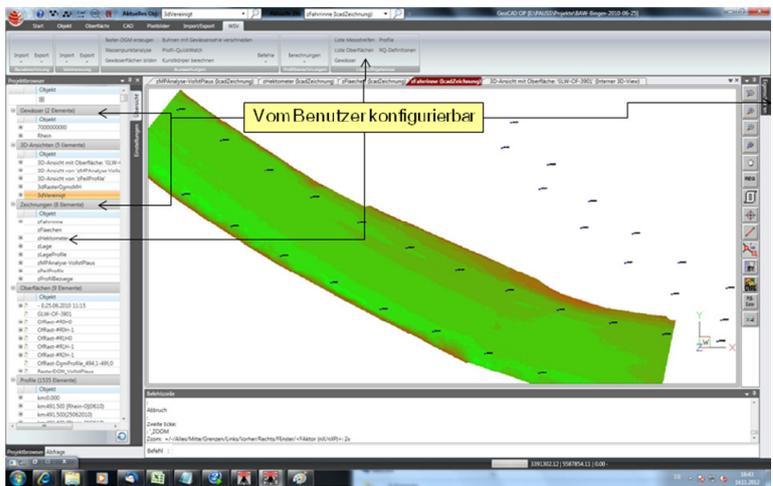


Abb. 7: Grundsätzliche Bildschirmteilung

3.6.2 Änderungen an der Datenhaltung und Filterung

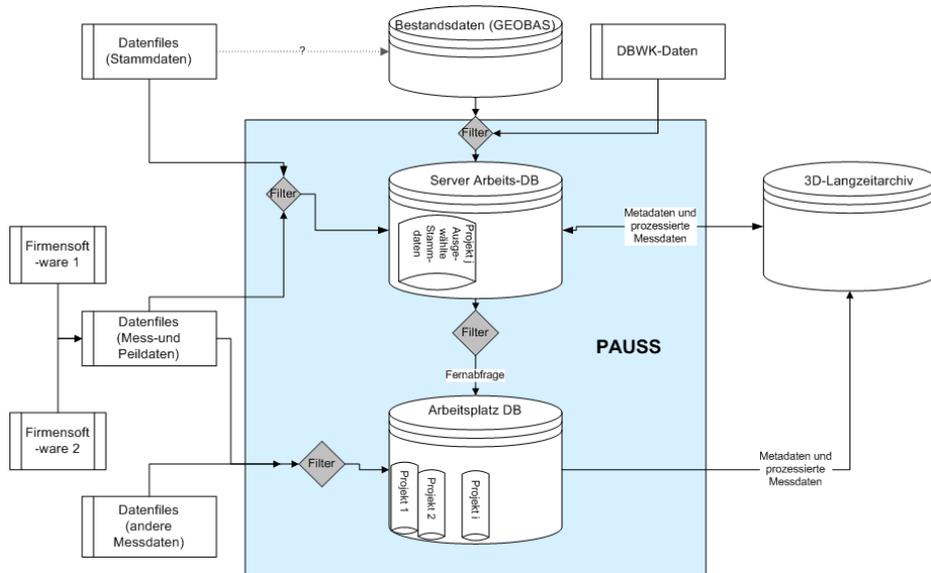


Abb. 8: Datenhaltung und Filterung

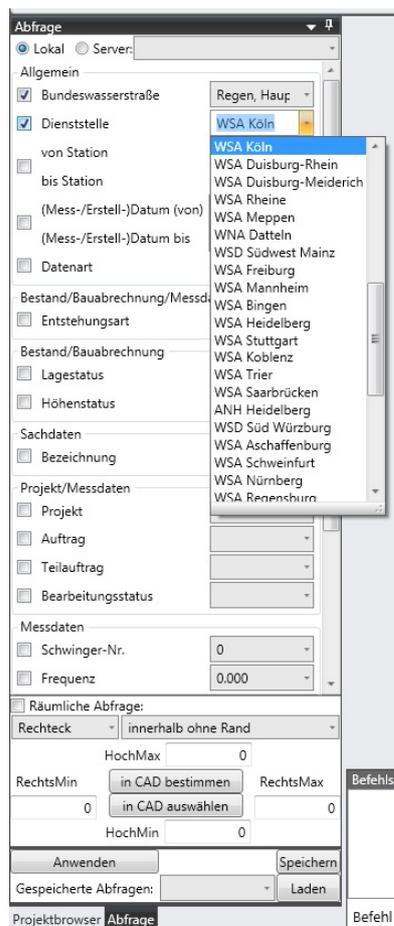


Abb. 9: Filterdialog

Neben den Änderungen an der Oberfläche wurde es aufgrund der gemachten Erfahrungen der ersten Programmversionen notwendig, eine Überarbeitung der Datenhaltung und der Filterung der Daten vorzunehmen. Die Datenhaltung ist im Lastenheft zum Projekt PAUSS skizziert. Aufgrund der dort gemachten Ausführungen wurde vom Auftragnehmer die Aufgabe wegen der vorhandenen Software so verstanden, dass alle notwendigen Daten auf einen Server oder in ein Projekt auf einem Arbeitsplatzrechner geladen würden und dann im Projekt mittels Filterung die Daten für den Benutzer zur Verfügung gestellt würden. Damit hätte die vorhandene Filterung nur erweitert werden müssen. Die Auftraggeberseite hingegen möchte die Datenfilterung sowohl schon beim Einlesen von Daten aus Dateien oder anderen Datenbanken, als auch beim Übertragen vom Server auf die Arbeitsplatzrechner und auf dem Arbeitsplatzrechner im Projekt selbst ausführen können (s. neuen Entwurf der RMR in Abb. 8), insgesamt also an mindestens vier unterschiedlichen Stellen. Damit wurde es notwendig, teil-weise komplett neue Filterungen, insbesondere für das Einlesen aus Dateien oder Fremddatenbanken zu entwickeln (Teil des Dialoges s. Abb. 9).

Der Entwurf zur Datenhaltung, wie in Abb. 8 dargestellt, wurde so dem Auftraggeber vorgestellt. Eine endgültige Freigabe durch den Auftraggeber steht noch aus.

3.6.3 Änderungen an der Virtualisierung und den Datenverknüpfungen

Die unter 3.3.1 Virtualisierung beschriebene Vorgehensweise der Software muss auch auf die Objekte, die PAUSS benötigt, angepasst und erweitert werden. Diese Arbeiten dauern derzeit noch an. Nach der Beendigung dieser Arbeiten ist die Datenmenge für PAUSS-Objekte in der Datenbank nur noch durch die Größe der Hardware sinnvoll begrenzt. Diese Änderungen sind aufwendig, ohne dass für den Anwender irgendein Fortschritt in der Programmierung sichtbar wird.

Anders als bisher, scheint es auch notwendig, dass die Verknüpfungen innerhalb der Software für den Endanwender parametrierbar werden, aufgrund der großen Datenmengen. Dies ist dem Auftragnehmer noch nicht ganz klar und bedarf weiterer Untersuchungen und Absprachen mit dem Auftraggeber.

4 Aktueller Stand der Entwicklung

Wie bereits mehrfach geschrieben, wirken sich die vorzunehmenden Änderungen nicht direkt auf den sichtbaren Fortschritt des Projektes aus. An diesen wird dennoch derzeit noch gearbeitet.

Die hydrographischen Datenschnittstellen, für die Testdaten vorlagen, sind bidirektional erstellt. Bis auf einige Unklarheiten, zu denen es noch der Erläuterungen durch den Auftraggeber bedarf, sind auch die REB- und GAEB-Schnittstellen und Berechnungsmethoden programmiert. Testdaten, die alle Fälle abdecken, liegen jedoch nach wie vor nicht vor. Auch die Zuordnung von Daten zu Testfällen, so dass die Spezialfälle auch abgedeckt werden könnten, gab es bisher nicht.

Das WPF-GUI Framework ist erstellt. Um damit als Endanwender arbeiten zu können, bedarf es jedoch weiterer Arbeiten, insbesondere der detaillierten Absprachen mit der Auftraggeberseite. Es wurde im Rahmen der Erstellung des Pflichtenheftes zwar prinzipiell besprochen, dass es Arbeitsabläufe geben müsse, die abzubilden seien. Aber die genaue Festlegung, was dort in welcher Reihenfolge zu geschehen hat und welche Voraussetzungen in den einzelnen Schritten angenommen werden dürfen, fehlt bisher.

Die im Vorangegangenen beschriebene Kommunikation zwischen dem GUI und dem Kern ist programmiert und wird nur noch, falls notwendig, erweitert. Auch die Kommunikation zwischen dem Server und dem Arbeitsplatz ist erstellt. Erweiterungen würden auch hier nur noch vorgenommen, wenn dies im Testbetrieb oder aufgrund von Erfahrungen der Nutzer als notwendig angezeigt würde.

Die Datenbank ist in Teilen angepasst, die Virtualisierung und die Möglichkeit der Parametrierung fehlen jedoch noch. Die Filterung innerhalb der Datenbank entsprechend den Wünschen des Auftraggebers ist angepasst. Auch die Filterung zwischen dem Server und dem Arbeitsplatz ist weitestgehend programmiert. Dies gilt auch für die Filterung beim Einlesen der Daten aus Dateien.

Weiter sind die speziellen WSV-Objekte erstellt sowie die Basis für die Anzeige dieser Objekte sowohl in Tabellen, der CAD als auch im 3D-Viewer programmiert (s. Abb. 10). Die weitergehenden Arbeitsabläufe sind nach wie vor nicht festgelegt.

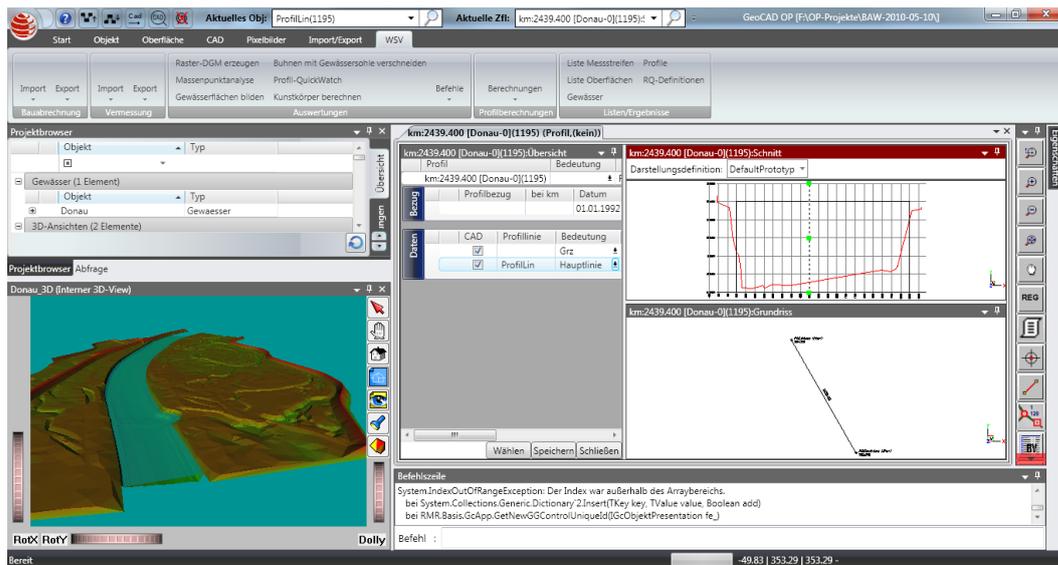


Abb. 10: Mögliche Ansichten am PAUSS-Arbeitsplatz

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die gemachten Ausführungen zeigen, dass sich die gewünschte Funktionalität mit der Basissoftware herstellen lässt. Die Änderungen, die dafür notwendig sind, gehen jedoch weit über eine reine Anpassung einer Software hinaus.

Um die Software auch benutzerfreundlich zu gestalten, bedarf es unbedingt einer engeren Zusammenarbeit und Kommunikation zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer. Dem Auftragnehmer ist zwar das Was bekannt, das Wie aber nicht in jedem Fall. Deshalb muss sich der Auftraggeber unbedingt aktiv am GUI- und Ablauf-Design beteiligen und daran mitarbeiten.

Dazu müssten

1. sowohl auf der Auftraggeber- als auch auf der Auftragnehmerseite zusätzliche Ressourcen bereitgestellt werden, auch in finanzieller Form,
2. aus Gründen der Praktikabilität der Auftraggeber einen ortsnahen Ansprechpartner benennen, der auch mit Entscheidungsbefugnis ausgestattet ist,
3. auf Auftragnehmerseite die Probleme besser kommuniziert werden, damit der Auftraggeber sie überhaupt erkennen kann.

Wenn diese Punkte erfüllt werden, so wird das Produkt PAUSS alle gestellten Anforderungen erfüllen können, und zwar

- > in einer Applikation für Gewässervermessung und Bautechnik,
- > mit der gewünschten Benutzerfreundlichkeit
- > und damit letztlich auch zukunftssicher sein.

In der anschließenden Diskussion wurde noch die Frage beantwortet, wann mit der Fertigstellung der Software zu rechnen sei. Dies wurde so beantwortet, dass dies, wenn die Punkte 1 bis 3 des letzten Abschnittes erfüllt würden, im Laufe des Jahres 2013 geschehen würde.

Kontakt:

Heinz-Erich Rader

Ahrweiler Straße 40

53474 Bad Neuenahr-Ahrweiler

Tel.: 02641 / 900520

Fax: 02641 / 31611

E-Mail: H.E.Rader@rmr.de

Dipl.Ing. für Vermessungswesen

geb. 1960

Tätig bei:

ÖBVI Rader;

RMR Softwareentwicklungsgesellschaft

1978-83

Studium Geodäsie an der Universität Bonn

1983-85 Referendariat

1985-87 Anerkennungszeit

seit 1987

ÖBVI

Gründung RMR Softwareentwicklungsgesellschaft

Softwareentwicklung

Aufgabenschwerpunkte:

Entwicklung von Software seit 1978, für Vermessung seit 1983

Gewässervermessungen mit Echolot seit 1989

Softwareentwicklung für diese Vermessungen auch seit 1989

Auswertung von Laserscannerdaten auf Tagebau-Absetzern seit ca. 2005

Kombination von Hydrographie und terrestrischen Laserscannern – systematische Effekte, Kalibrier- und Auswertemethoden

Friedrich Keller und Harald Sternberg

1 Einleitung

Dreidimensionale Geodaten werden in der modernen Informations- und Kommunikationsgesellschaft auf allen Ebenen immer wichtiger. Verschiedene Faktoren führen zu einem stetig steigenden Bedarf an solchen Geodaten, wodurch hohe Anforderungen an die effiziente Erfassung (aktuelle und kostengünstige Daten) und umfängliche Verfügbarkeit (schnell, einfach, flächendeckend und großmaßstäbig) gestellt werden.

Für eine effiziente 3D-Datenerfassung bieten sich mobile Sensorsysteme an. Dazu gehören Mobile Mapping Systeme, die sowohl auf dem Land als auch in der Luft und auf dem Wasser einsetzbar sind. In diesem Beitrag steht die Integration von terrestrischen Laserscanningsystemen (TLS) in schiffsbasierten Multisensorsystemen im Vordergrund. In KELLER et al. (2011) wird bereits ein solches System vorgestellt. Hier soll näher auf die systematischen Effekte und die Kalibrierung eines solchen Systems eingegangen werden.

2 Komponenten

Um einen Laserscanner in ein hydrographisches Messsystem integrieren zu können, muss dieses Messsystem einige Voraussetzungen erfüllen bzw. einige Komponenten zur Positionsbestimmung enthalten. Auf diese Komponenten wird im Folgenden näher eingegangen.

2.1 Global Navigation Satellite System (GNSS)

Für die absolute Positionsbestimmung in einem übergeordneten Koordinatensystem ist in der heutigen Zeit eine GNSS-Lösung nicht mehr wegzudenken. Die GNSS-Lösung liefert dabei den wesentlichen Beitrag zur Positionsbestimmung. Auf Vermessungsschiffen und bei anderen Multisensorsystemen sind verschiedenste Systeme anzutreffen. Aufgrund dieser Vielzahl sollen hier nur einige Möglichkeiten aufgeführt werden.

Die Positionsbestimmung erfolgt grundsätzlich durch ein oder mehrere Satellitensysteme. Die bekanntesten sind zur Zeit GPS und GLONASS; in Zukunft werden auch neuere Systeme wie GALILEO, COMPASS und IRNSS eine Rolle spielen.

Neben dem Satellitensystem ist die Antennen- und Empfänger-ausstattung in einem Multisensorsystem von hoher Bedeutung. Bei kompakten Systemen wird meist nur eine Antenne eingesetzt. Aufgrund ihrer Größe bietet sich auf Fahrzeugen oder Schiffen die Nutzung eines Antennenarrays an. Daraus können zu jeder Epoche nicht nur Positionsinformationen sondern auch Lageinformationen gewonnen werden.

Um die Positionsinformationen aus den GNSS-Daten zu erhalten, bieten sich verschiedene Prozessierungs- und Auswertemethoden an. Tabelle 1 liefert eine kleine Übersicht der Möglichkeiten sowie der erreichbaren Genauigkeit.

Tabelle 1

GNSS-Positionsbestimmungen mit Genauigkeiten (Quelle: STERNBERG 2000)

	C/A	DGPS mit C/A	Phasen geglätteter Code	PPP	RTK	Trägerphase
rel. Genauigkeit	5-10 m	0,3-3 m	0,3-3 m	3-4 cm	1-3 cm +1 ppm	5-15 mm +1-2 ppm

Die meist genutzte Lösung ist die Positionsbestimmung mittels RTK mit einem gängigen Korrekturdatendienst wie VRS-NOW, SAPOS, ASCOS oder AXIO-NET.

Neben der absoluten Positionsbestimmung liefert das GNSS noch einen weiteren für Multisensorsysteme wichtigen Beitrag, nämlich ein übergeordnetes präzises Zeitsystem. Dieser Pulse-Per-Second (PPS) ermöglicht es, alle Sensoren des Systems exakt zu synchronisieren.

2.2 Inertial Measurement Unit (IMU)

Neben der Positionsbestimmung durch GNSS muss auch die Lage des Systems im Raum bestimmt werden. Diese kann durch GNSS-Arrays erfolgen. Allerdings werden dazu in der Praxis vorwiegend Inertial Measurement Units (IMU) eingesetzt. IMUs bestehen normalerweise aus drei Gyroskopen und drei Beschleunigungsmessern. Mit diesen sechs Komponenten lässt sich frei im Raum navigieren. Die Rotation liefern die Gyroskope, die gemessenen Winkelgeschwindigkeiten werden zu Winkeln integriert. Die Messung der Translation erfolgt über die zweifache Integration der gemessenen Beschleunigungen.

In der Theorie würde dieses System vollkommen ausreichen, um die relative Position eines Multisensorsystems zu bestimmen. Da auch diese Sensoren in der realen Umgebung mit einem Messrauschen behaftet sind, neigen sie dazu, weg zu drifteten und zwar je nach Sensorgüte relativ schnell. Diese Drift macht somit den Einsatz von GNSS unerlässlich. IMUs liefern Positions- und Lageinformationen sehr hochfrequent. Mit max. 300 Hz liegen sie gegenüber dem GNSS deutlich höher, welches lediglich eine Frequenz von max. 20 Hz erreicht. Die hohe Frequenz ist für die Integration von Laserscannern sehr wichtig, weil diese Daten im Bereich von Millionen Punkten pro Sekunde liefern (1 MHz). Mit dieser Datenrate muss dann die Bewegung des Multisensorsystems sehr genau erfasst werden.

IMUs werden in verschiedenen Genauigkeitsklassen gefertigt, wobei einige System aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit unter die *International Traffic in Arms Regulations* (ITAR) fallen.

Roll- und Pitchwinkel ermitteln die Systeme meist aus einer Kombination von Gyroskopen und Beschleunigungsmessern. Dabei liefert das Gyroskop die hohen Dynamiken und der Beschleunigungsmesser den Erdschwerevektor (Normalenvektor des Horizontes). Aus diesem Grund lassen sich Roll- und Pitchwinkel i. d. R. genauer erfassen als das Azimut. Im

Bereich der hochgenauen Multisensorsysteme haben sich für die Gyroskope zwei Bauarten durchgesetzt: zum einen die faseroptische Gyroskope und zum anderen die Ringlaser-Gyroskope. Eine neue Bauform von Gyroskopen sind sogenannte MEMS-Sensoren, die allerdings noch nicht die geforderten Genauigkeiten liefern können (KELLER et al. 2012). Tabelle 2 fasst die an der HCU Hamburg für Multisensorsysteme bereits eingesetzten IMUs kurz mit ihren erreichbaren Winkelgenauigkeiten zusammen.

Tabelle 2

An der HCU eingesetzte IMUs

	OCTANS	HYDRINS	PHINS	iNAV-FMS-E-DA	iNAV-RQH
Roll / Pitch	0,01°	0,01°	0,01°	0,05°	0,005°
Heading (deg sec lat.)	0,1°	0,02°	0,01°	0,1°	0,008°
System	FOG	FOG	FOG	FOG	RLG
Position (free)	-	-	0,6 Nm/h	~ 3 Nm/h	0,5-0,8 Nm/h

Die Vergleichbarkeit der Systeme ist nicht immer ganz leicht, da die Hersteller unterschiedliche Angaben in den Datenblättern machen. Deutlich wird allerdings, dass in den letzten Jahren die faseroptischen Systeme gegenüber den Ringlaser-Systemen in Sachen Genauigkeit aufgeholt haben.

Die beschriebenen Komponenten sind für die Positions- und Lagebestimmung des Multisensorsystems unerlässlich. Bei hydrographischen Messsystemen mit Multibeamecholoten sind diese Komponenten aber meist schon vorhanden.

Nun soll noch auf den neu zu integrierenden Sensor, den Laserscanner, eingegangen werden.

2.3 Laserscanner

Der Markt bietet im Bereich des Laserscannings ebenfalls eine Vielzahl an Komponenten. Aus diesem Grund wird hier nur auf die zwei Systeme näher eingegangen, die an der HCU Hamburg bereits in Multisensorsystemen eingesetzt werden.

Laserscanner lassen sich einfach nach ihrem Streckenmessverfahren in Gruppen einteilen. Es gibt Laserscanner mit Phasenvergleichsverfahren (z. B. Scanner der Firma Zoller + Fröhlich) und welche mit Impulslaufzeitmessung (z. B. Scanner der Firma RIEGL). Grundsätzlich unterscheiden sich diese Systeme derzeit in Reichweite und messbaren Punkte pro Sekunde. Im folgenden Kapitel wird auf die Scanner detaillierter eingegangen.

Tabelle 3

Mögliche Laserscanner für Multisensorsysteme

	ZF 5006h	ZF 5010	RIEGL VZ400	RIEGL VQ450
Reichweite	79 m	187 m	350 m	<800 m
Messrate	1,016 Mio.	1,016 Mio.	0,112 Mio.	0,550 Mio.
Strahldivergenz @60m 0.3mrad=2mm	0,22 mrad	<0,3 mrad	0,35 mrad	0,3 mrad
Winkelauflösung	0,0018°	0,0004°	0,0024°	0,001°
Laserklasse	3R	1	1	1

3 Zufällige und systematische Abweichungen

Um den Einsatz von Laserscannern in einem Multisensorsystem zu verstehen, soll zunächst ein Überblick über ihre Messeigenschaften verschafft werden. Wie bereits erwähnt können Laserscanner grob in zwei Gruppen aufteilt werden.

Ein Vergleich der unterschiedlichen Systeme zeigt, dass die Impulsscanner bei der Reichweite deutlich im Vorteil sind. Phasenscanner hingegen erreichen dafür eine viel höhere Punktdichte und Scanrate (bis zu 1 Mio. Punkte pro Sekunde). Zudem weisen Phasenscanner ein sehr geringes Messrauschen auf. Die folgende Abb. 1 zeigt die unterschiedlichen Messweisen der zwei Scannersysteme.

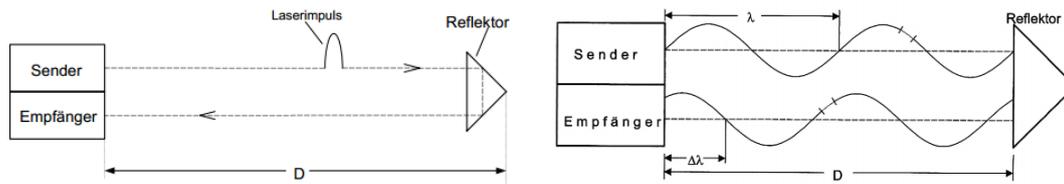


Abb. 1: Impulslaufzeitverfahren links; Phasenvergleichsverfahren rechts (Quelle: JOECKEL et al. 2008)

Was die Impulsscanner der Firma RIEGL trotz ihrer geringen Messrate interessant macht, ist das Verfahren der full-wave-form-Analyse. Dabei wird gemessen, mit wie viel Energie der Messimpuls ausgesandt wird, und jegliche zurückgestrahlte Energie wird als Messpunkt interpretiert. Dieses Verfahren eignet sich zum Beispiel bei luftgestütztem Laserscanner sehr gut, um durch Vegetation zu messen, da das letzte "Echo" als der Boden interpretiert werden kann.

Da ein Scanner ein polarmessendes System ist, setzt sich die ermittelte Koordinate aus zwei Winkelmessungen und einer Streckenmessung zusammen. Bei Scannern in Multisensorsystemen ist meist eine Achse fixiert, so dass auch vom Profilmodus gesprochen wird. Für eine Koordinate werden somit lediglich die Streckenmessung und eine Winkelmessung benötigt, der zweite Winkel ist durch die Fixierung konstant. Die Winkelabgriffe sind mit bis zu $0,0004^\circ$ sehr präzise. Den größten Einfluss auf die Genauigkeit eines Scanpunktes hat die Streckenmessung. Diese ist zum einen abhängig vom Messverfahren. Auf einer rechtwinklig gescannten Oberfläche ist das Messrauschen der Phasenvergleichsscanner etwas besser als bei den Impulsscannern.

Zum anderen wird die Streckenmessung durch die Umwelt stark beeinflusst. Die erreichbaren Genauigkeiten variieren stark: Sie sind korreliert mit dem Auftreffwinkel und den Materialeigenschaften des Objekts (Farbe und Rauigkeit), auf das der Strahl trifft.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft eine Untersuchung von KERSTEN et al. (2009), wie sich die Strecke ändert, wenn sich der Auftreffwinkel auf ein Objekt ändert.

Weitere Eigenschaften von Scannern können unter KERN (2011) und MECHELKE (2011) nachgeschlagen werden.

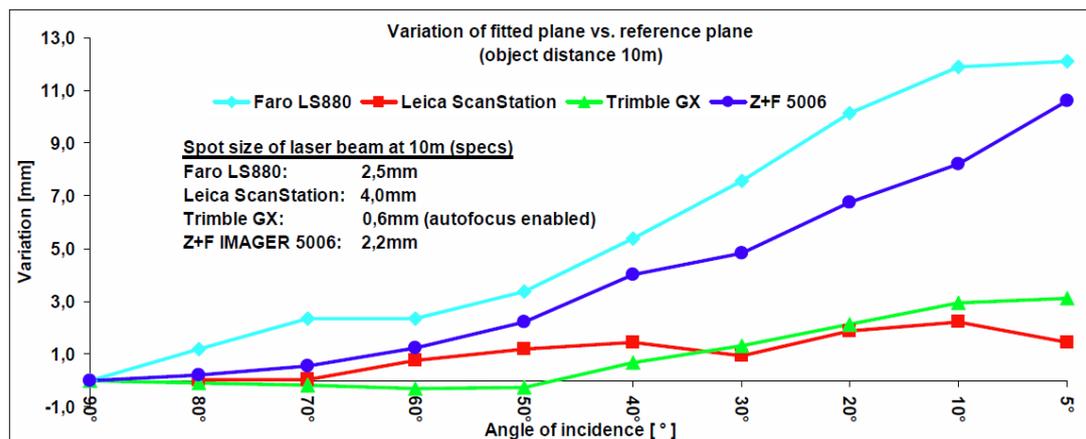


Abb. 2: Abhängigkeit der Streckenmessung vom Auftreffwinkel

In Multisensorsystemen kommt es aufgrund des Zusammenspiels der verschiedenen Komponenten schnell zu systematischen Fehlern, verursacht durch falsche oder nicht bekannte Einbaupositionen oder Einbaulagen. Die häufigsten Fehlerquellen sind dabei die Zeitsynchronisation, die drei Einbauwinkel Roll, Pitch und Yaw und die lever-arms zwischen den Komponenten. Auf die Beseitigung dieser Fehler durch eine Systemkalibrierung wird im folgenden Kapitel eingegangen.

4 Kalibrierung

Um mit den in Kapitel 2 aufgeführten Komponenten ein gutes vermessungstechnisches Ergebnis zu erzielen, muss das Gesamtsystem bestehend aus GNSS-Antenne, IMU und Laser-scanner kalibriert werden. Dabei spielen sowohl Position und Lage als auch die Zeit eine Rolle. Um zu verstehen wie die Kalibrierung durchgeführt werden kann, ist es zuvor wichtig, Kenntnis von allen beteiligten Koordinatensystemen zu haben.

Tabelle 4
Koordinatensysteme

	GNSS	INS	System	Scanner
Übliche Bezeichnung	WGS84	Inertial	Body	-
Earth centered	ja	ja	nein	nein
Earth fixed	ja	nein	nein	nein
Ausrichtung	Meridian	Fix-Sterne/ Startlage/	Auf Schiff definiert	Im Drehpunkt des Scanners

Das für die eigentliche Kalibrierung des Gesamtsystems wichtige Koordinatensystem ist das als Body-Koordinatensystem beschriebene Fahrzeug- oder plattformartige System. Dabei kommen verschiedene Ausrichtungen in Betracht. Hier sollen zwei für Multisensorsysteme typische Festlegungen beschrieben werden.

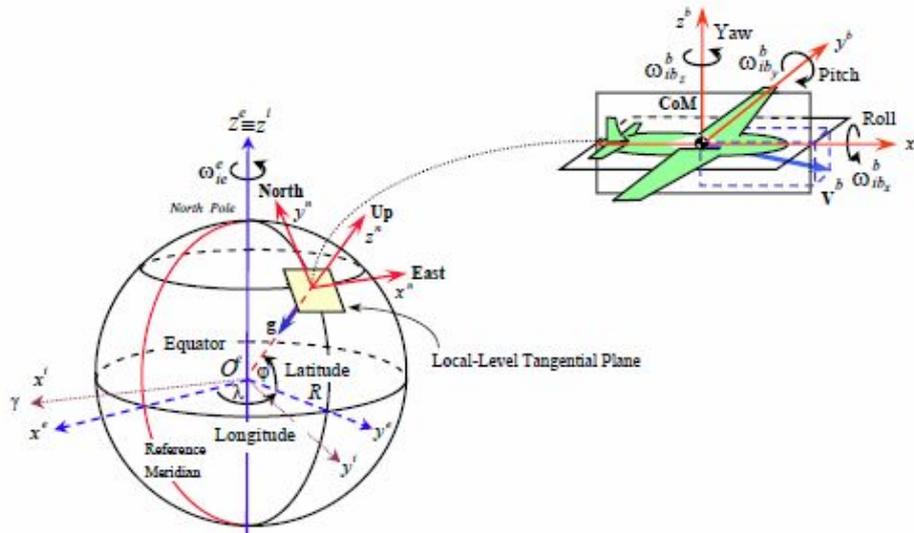


Abb. 3: Zusammenspiel der Koordinatensysteme (Quelle: DOROBANTU & GERLACH 2004)

Auf einem Vermessungsschiff wird das Koordinatensystem meist wie folgt definiert: Im Heck des Schiffes wird der Ursprung festgelegt, die X-Achse zeigt zum Bug, die Y-Achse nach Steuerbord oder Backbord. Für die XY-Ebene wird ein gemeinsamer Höhenbezug für die Punkte am Bug und an Steuerbord/Backbord auf dem Schiff gewählt, die Z-Achse ergibt sich.

Die zweite typische Koordinatensystemfestlegung wird meist auf kompakten Messplattformen eingesetzt. Dabei fällt das Body-Koordinatensystem der Messplattform mit dem vom Hersteller der IMU vorgegebenen IMU-Body-System zusammen. Diese Festlegung hat bei der späteren Berechnung deutliche Vorteile. Die von der IMU gemessenen Winkel können ohne Transformation direkt auf alle Objekte angewendet werden.

Für die Beschreibung der Vorgehensweise der Kalibrierung des Systems wird vom zweiten Fall ausgegangen, wobei IMU- und Body-Koordinatensystem zusammenfallen.

Um GNSS, IMU und Laserscanner nun zu verknüpfen, muss zunächst der Vektor zwischen der GNSS-Antenne und der IMU bestimmt werden. Dieser sogenannte lever-arm wird mit XYZ-Koordinatenablagen im IMU-System angegeben. Die später gemessenen GNSS-Koordinaten werden anschließend mit dem lever-arm und der von der IMU ermittelten Lage über das IMU-/Body-System transformiert. GNSS und IMU messen somit den gleichen Punkt und können in einem Filter, das in Kapitel 5 beschrieben wird, zusammengeführt werden.

Der zweite lever-arm, der im Body-System bestimmt werden muss, ist der des Laserscanners. Dieser wird später benötigt, um die Scanpunkte zu transformieren.

Neben den lever-arms muss auch die Einbaulage der Komponenten diskutiert werden. Für die GNSS-Antenne sind die Einbauwinkel in das Multisensorsystem nicht von Bedeutung, da sich die Antenne wie ein punktförmiges Objekt verhält. Sehr wichtig sind allerdings die Einbauwinkel des Laserscanners, da dies wie bereits erwähnt ein polares Messsystem ist. Ein falsch bestimmter Einbauwinkel führt zu einer falschen Transformation und somit zu einer deformierten Punktwolke.

An dieser Stelle soll nun auf die nötige Genauigkeit zur Bestimmung der lever-arms und der Einbauwinkel eingegangen werden. Alle Überlegungen dazu werden exemplarisch am Laserscanner beschrieben, gelten allerdings auch für den lever-arm der GNSS-Antenne.

Ziel ist es, die Lage des Scannerkoordinatensystems innerhalb des Body-Koordinatensystems zu bestimmen. Dazu eröffnet der Laserscanner zwei Wege: die interne und die externe Bestimmung von Position und Lage.

4.1 Interne Positions- und Lagebestimmung

Zur internen Positions- und Lagebestimmung kann der Scanner als Messsystem selbst genutzt werden. Dazu werden an Bord oder auf der Messplattform genügend Zielmarken räumlich verteilt angebracht. Diese werden extern in das Body-System eingemessen. Der Scanner kann nun durch einen einfachen 360-Grad-Scan diese Ziele erfassen, wodurch die Transformationsparameter zwischen beiden Systeme ermittelt werden können. Als Ziele bieten sich Kugeln oder S/W-Targets an. An dieser Stelle sei aber von Seiten der Autoren von diesem Verfahren abgeraten. Dieses Einmessverfahren für den Laserscanner bedingt, dass der Scanner frei drehen kann und nach der Einmessung ggf. fixiert wird. Bei dieser Fixierung oder durch hohe Dynamiken während der Messung kann es zur Zerstörung oder Beschädigung der Wälzlager im Scanner selbst kommen, was unbedingt vermieden werden sollte. Aus diesem Grund hat Zoller + Fröhlich an der Scannerunterseite vier Bohrungen angebracht, über die der Scanner fixiert werden kann, so dass der Dreifuß unbelastet bleibt. Dadurch ist dann die Möglichkeit der internen Bestimmung ohnehin nicht mehr gegeben. Gleiches gilt für Scanner, die nur im Profilmodus arbeiten.

4.2 Externe Positions- und Lagebestimmung

Zur externen Positions- und Lagebestimmung können verschiedene Messgeräte eingesetzt werden. Dies ist immer von der Größe des Objekts abhängig. In Frage kommen Tachymeter, Photogrammetrie, Streifenprojektionssysteme und Lasertracker. Für die Messplattform an der HCU wird ein Streifenprojektionssystem eingesetzt, da die Größe der Messplattform nur 1 m x 0,4 m beträgt.

Für eine Einschätzung, wie genau die Messung zu erfolgen hat, sollen zwei Beispiele dienen. Im ersten Beispiel wird davon ausgegangen, dass der lever-arm des Laserscanners um 10 mm falsch bestimmt wurde. Weiter wird angenommen, dass das Fahrzeug auf einer Straße mit 2 % Steigung (Pitch) fährt; dies kann bei Schiffen durch Wellen deutlich mehr sein. Der falsch bestimmte lever-arm erzeugt somit einen Koordinatenfehler in Z-Richtung von rund 0,2 mm, was bei der Messgenauigkeit des Scanners noch vertretbar wäre.

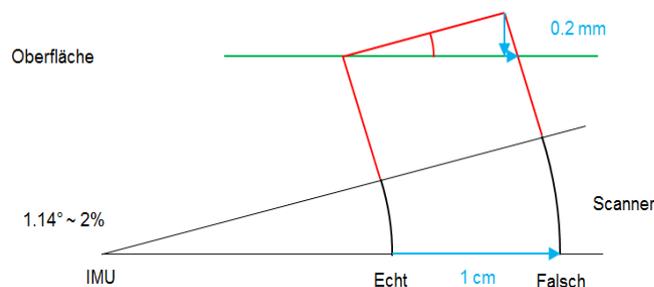


Abb. 4: Bestimmung des Rollwinkelfehlers eines Schiffes, dieser kann analog auf MMS übertragen werden

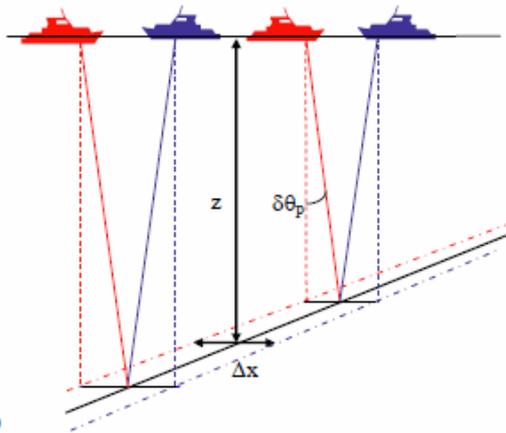


Abb. 6:
Bestimmung des Pitchwinkelfehlers eines Schiffes, dieser kann analog auf MMS übertragen werden (Quelle: IHO 2010)

Zur Aufdeckung eines Azimutfehlers werden zwei Trajektorien parallel zum Objekt gefahren, wobei die Geschwindigkeit nicht von Bedeutung ist, allerdings sind unterschiedliche Abstände zum Objekt wichtig. Durch den parallelen Versatz ergibt sich eine dem fehlerhaften Azimut entsprechende Punktverschiebung (Abb. 7).

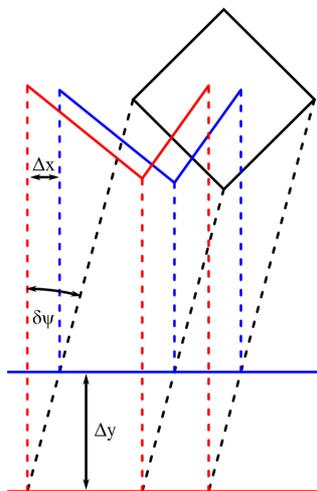


Abb. 7:
Azimutfehler eines MMS

Zur Bestimmung des Zeitrestfehlers in der Synchronisation des Laserscanners mit dem Positions- und Lagewinkelsystem wird die gleiche Trajektorie zweimal mit unterschiedlicher aber konstanter Geschwindigkeit befahren. Dadurch fallen Fehler in den Einbauwinkeln heraus, da sie sich auf beiden Fahrten in gleicher Weise auswirken (Abb. 8).

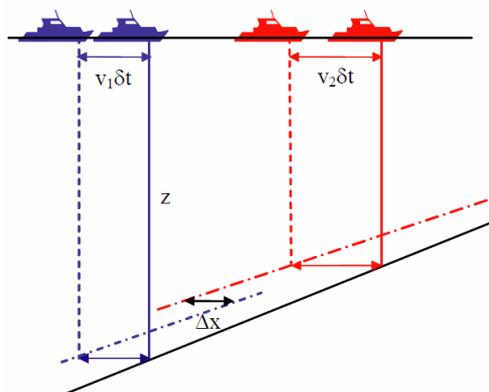


Abb. 8:
Bestimmung von Zeitoffsets (entspricht Draufsicht beim MMS auf das Schiff) (Quelle: IHO 2010)

5 Auswertung

In den Softwarepaketen zur Auswertung müssen GNSS-, IMU- und Scandaten in geeigneter Weise verknüpft werden. Neben der Bestimmung der Kalibrierung ist es auch erforderlich, die Trajektorie zu prozessieren sowie alle Scanpunkte entsprechend zu transformieren. Grundsätzlich kann in Online- und Postprocessing unterschieden werden. Bei der großen Datenmenge, die mit dem Laserscanner erreicht werden kann, und aufgrund der Messgenauigkeit liefert nur das Postprocessing zufriedenstellende Werte.

Um GNSS und IMU zu einer exakten Position zu verknüpfen, wird häufig ein Kalman-Filter angewendet. Dieser ermöglicht es, die aus den verschiedenen Sensoren gewonnenen Informationen zu einer optimalen Schätzung der Position zusammenzuführen. Als Messgrößen können Winkelgeschwindigkeiten (IMU), Beschleunigungen (IMU), Position (GNSS) und Geschwindigkeit (GNSS und ADCP) in die Auswertung einfließen.

Die Qualität der Schiffstrajektorie ist maßgeblich für die erreichbare Genauigkeit der Laser-Scanpunktswolke. Ein kleines Beispiel eines Kalman-Filters soll dazu dienen, den Vorteil des Postprocessings für die Trajektorie deutlich zu machen.

Die Länge eines Objektes soll mit der Hilfe eines Kalman-Filters bestimmt werden. Die wahre Länge des Objektes beträgt 0,4. Die mit dem Messsystem ermittelten Längen streuen erwartungsgemäß zufällig um die wahre Größe. Nach einer gewissen Zeit fällt das Messsystem für einen kurzen Moment aus, eine ähnliche Situation wie bei einer GNSS-Anlage unter Brücken. Bei einem Onlinefilter wird die Trajektorie nun zunehmend schlechter. Im Postprocessing kann sich hingegen der Filter auch in der Zeit zurückbewegen und dadurch den Fehler deutlich besser auffangen. Abbildung 9 verdeutlicht diesen Zusammenhang nochmals.

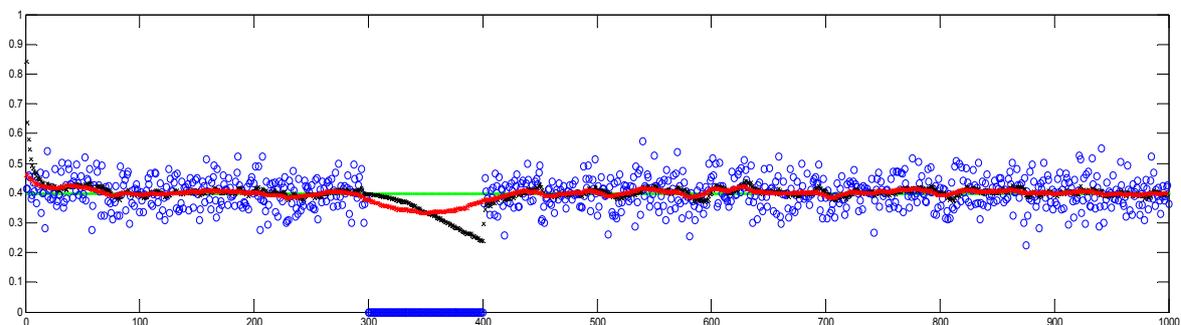


Abb. 9: Optimale Schätzung einer konstanten Größe mittels Kalman-Filter; grün = wahrer Wert, blau = Messdaten, schwarz = einfacher Onlinefilter, rot = Postprocessingfilter

Der Markt der Softwareprodukte zur Erstellung von Trajektorien ist sehr unübersichtlich, fast jeder Hersteller von Hardware bietet auch eigene Softwareprodukte an.

Mit der fertigen zeitlich referenzierten Trajektorie kann im Anschluss jeder Scanpunkt transformiert werden. Auch hierzu gibt es, meist von den Scannerherstellern, Softwareprodukte, die das bewerkstelligen. Zudem können diese Produkte meist auch die Feldkalibrierung des Systems unterstützen.

6 Fazit

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Integration von Laserscannern in ein Multi-sensorsystem, wie es beispielsweise auf einem Vermessungsschiff vorliegt, möglich ist. Laserscanner ähneln den Multibeamecholoten auf diesen Schiffen von der Datenstruktur (Punktwolke) sehr. Aus diesem Grund können sie auch ähnlich kalibriert und behandelt werden. Da Laserscanner allerdings deutlich genauer messen können, ist hier beim Einbau und der Kalibrierung besondere Sorgfalt walten zu lassen. Laserscanner und IMU sollten möglichst nah beieinander verbaut werden, um etwaige Schiffsverwindungen auszuschließen. Die Einmessung sollte mindestens mit einem Tachymeter erfolgen. Aufgrund der hohen Messraten und der Dynamiken sowie der Messgenauigkeit ist besonders auf die exakte Zeitsynchronisation zu achten. Für eine saubere und vollständige Kalibrierung ist es notwendig für Näherungswerte zunächst die Komponenten mit einem Tachymeter einzumessen und anschließend die Kalibrierung durch ein Feldverfahren zu verbessern.

Der Tatsache geschuldet, dass das Messergebnis des Scanners im Falle einer kinematischen Vermessung stark von der Trajektorie abhängt, kommt hierfür nur das Postprocessing in Frage. Mit dem zusätzlichen Laserscanner an Bord des Vermessungsschiffes kann in einer Messfahrt zugleich unter und über Wasser die natürliche und künstliche Bebauung erfasst und exakt vermessen werden.

Literatur

- DOROBANTU, R., C. GERLACH (2004): Investigation of a Navigation-Grade RLG SIMU type iNAV-RQH. IAPG / FESG No. 16 Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie. München.
- IHO (2010): www.iho.int/iho_pubs/CB/C-13/english/C_13_Chapter_3_December2010.pdf
Zuletzt abgerufen: 6.11.2012.
- JOECKEL, R., M. STOBER, W. HUEP, (2008): Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann Verlag Berlin.
- KELLER, F., V. BÖDER, C. HESSE, A. SAUER (2011): Kinematisches Terrestrisches Laserscanning zur Aufnahme von Kaianlagen. In: Geoinformationen für die Küstenzone. Beiträge des 3. Hamburger Symposiums zur Küstenzone und Beiträge des 8. Workshops zur Nutzung der Fernerkundung im Bereich der BfG/Wasser- und Schifffahrtsverwaltung: TRAUB, K.-P. und KOHLUS, J. und LÜLLWITZ, T., S. 41-50.
- KELLER, F., T. WILLEMSEN, H. STERNBERG (2012): Calibration of Smartphones for the use in indoor navigation. In: 2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Sydney.
- KERSTEN, TH., K. MECHELKE, M. LINDSTAEDT, H. STERNBERG (2009): Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, Heft 4, pp. 301-316.
- KERN, F. (2011): Praktische Erfahrungen bei der TLS-Prüfung. 4. Hamburger Anwenderforum Terrestrisches Laserscanning.

MECHELKE, K. (2011): Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner an der HCU Hamburg. 4. Hamburger Anwenderforum Terrestrisches Laserscanning.

STERNBERG, H. (2000): Zur Bestimmung der Trajektorie von Landfahrzeugen mit einem hybriden Messsystem. Diss. Universität der Bundeswehr München Neubiberg.

Kontakt:

M.Sc. Friedrich Keller

HafenCity Universität Hamburg

Ingenieurgeodäsie und Messtechnik

Hebebrandstraße 1

22297 Hamburg

Tel. 040/ 4282 75 391

E-Mail: friedrich.keller@hcu-hamburg.de

Prof. Dr.-Ing. Harald Sternberg

Ingenieurgeodäsie und geodätische Messtechnik

HafenCity Universität Hamburg

Hebebrandstraße 1

22297 Hamburg

Tel. 040/ 42827 5300

E-Mail: harald.sternberg@hcu-hamburg.de

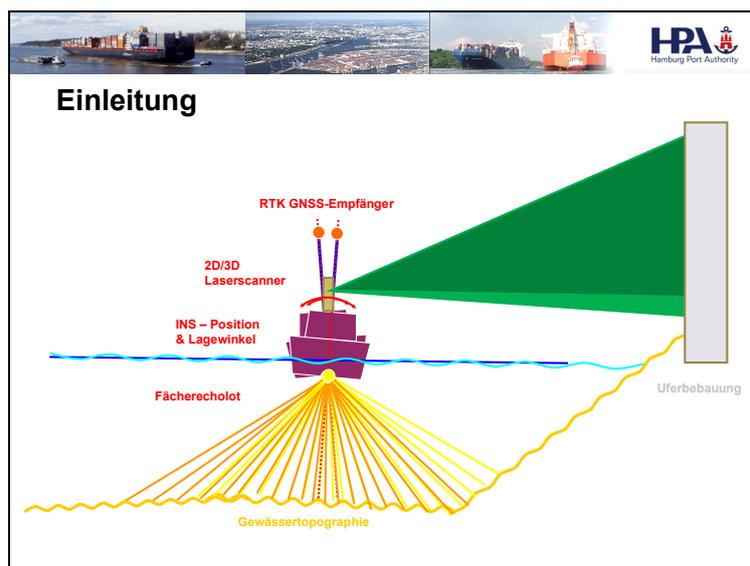
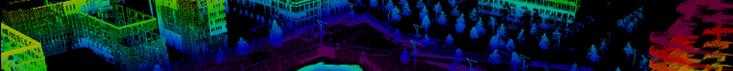
Objektvermessung mit kombinierten hydrographischen Vermessungssystemen – Erfahrungen mit mobilen Laserscannern im Hamburger Hafen

Thomas Thies



Einleitung

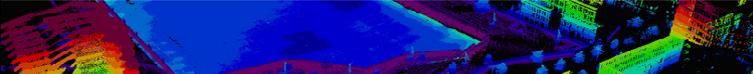
- Seit Mitte der siebziger Jahre existieren Fächerecholote, die in den Neunzigern auch der freien Wirtschaft zugänglich wurden
- Fächerecholote dienen der flächenhaften “mobilen” Erfassung der Gewässertopographie mittels hydroakustischer Laufzeitmessung
- Terrestrische Laserscanner entstanden aus der Weiterentwicklung von elektrooptischen Tachymetern und LIDAR Systemen und dienen der flächenhaften Erfassung der Umgebung über Wasser
- Durch die Möglichkeit des nahezu nahtlosen Übergangs zwischen “nassen” und “trockenen” Daten bietet sich die Integration beider Sensoren auf einem Messschiff an
- Laserscanner können daher unter bestimmten Voraussetzungen auch als hydrographische Sensoren bezeichnet werden, da:





Sensor Integration auf "Deepenschriewer III"

- Integration eines terrestrischen Laserscanners in ein hydrographisches Multisensormessschiff erfolgte unter den folgenden Gesichtspunkten:
 - Referenzierung aller beteiligten Messsensoren im schiffsfesten 3D-Koordinatensystem durch Einmessung
 - Zeitsynchronisierung aller beteiligten Sensoren
 - Bestimmung der Lagewinkeloffsets aller Sensoren im Schiffskoord.system durch Einmessung und Kalibrierung
 - Konfiguration der EDV-Anlage für Online + Offline Zusammenführung der Daten zu georeferenzierten Punktwolken inkl. Datensicherungslösung



- Laserscanner fest im Messschiff installiert und im Schiffskoord.-system referenziert (aktuell)

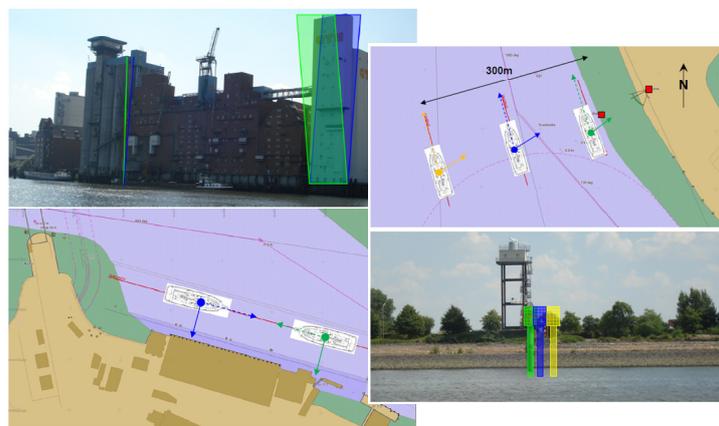


Sensor Integration auf "Deepenschriewer III"

- RTK-Positionierung: Trimble SPS851H (VRS-Now)
- Inertiales Messsystem: IXSEA HYDRINS
 - Heading (1σ) $\pm 0.034^\circ$ (Hamburg)
 - Roll/Pitch (1σ) $\pm 0.01^\circ$ / Drift $0.01^\circ/h$ (free inertial)
- Fächerecholot: Reson Seabat 7125 SV2 FP3 (200/400 kHz)
 - max. 512 Beams, max. 165° Fächerbreite, Messrate bis 50 Hz, Reichweite bis 500 m, ED/EA Mode
 - $0.5^\circ \times 1.0^\circ$ Beamöffnung @ 400kHz
- Terrestrischer Laserscanner Riegl VZ-400
 - Laser Class 1 (near infrared) 0.017° Beam Divergenz, Punktabstände @100m 0.4cm(0.0024°) bis zu 50cm(0.288°)
 - Messrate im Profilmodus bis zu 120 Linien/s
 - High speed: 125.000 Pkt / s max. Reichweite 300m
 - Long range: 42.000 Pkt / s max. Reichweite 500m



Sensor Integration – Einmessung + Kalibrierung




Genauigkeitsbetrachtung – *a priori* Unsicherheit

- **Fehlereinflüsse in mobilen Scananwendungen**
 - **Vertikale Fehlereinflüsse:**
 - Messunsicherheit des Scanners (Strecken und Winkel)
 - Messunsicherheit des INS (Rollen, Stampfen, Hub)
 - Einmessgenauigkeit der Offsets zw. den Sensoren (Höhe)
 - Messunsicherheit bei Positionierung (GNSS/INS Höhe)
 - **Horizontale Fehlereinflüsse:**
 - Messunsicherheit des Scanners (Strecken und Winkel)
 - Messunsicherheit des INS (Rollen, Stampfen, Kurs)
 - Einmessgenauigkeit der Offsets zw. den Sensoren (Lage)
 - Messunsicherheit bei Positionierung (GNSS/INS Lage)
 - weiterhin existieren viele zusätzliche Fehlereinflüsse die auf Instrumentenfehlern, ungenau bestimmten atmosphärischen Parametern und den Oberflächeneigenschaften der detektierten Objekte basieren



Genauigkeitsbetrachtung – *a priori* Unsicherheit

- **Die Ergebnisse:**

System	Parameter	Accuracy	Unit
Laser Scanner	Range σ_R :	0.005	m
	Pan Angle σ_Φ :	0.001	°
	Tilt Angle σ_Θ :	0.001	°
Motion Sensor / IMU	Pitch σ_φ :	0.03 / 0.01	°
	Roll σ_θ :	0.03 / 0.01	°
Lever Arms	Yaw σ_ψ :	0.336 / 0.034	°
	$\sigma_{Xmru-las}$:	0.001	m
	$\sigma_{Zmru-las}$:	0.001	m
GNSS/IMU	$\sigma_{Xgps=sg}$:	0.02 / 0.01	m
	$\sigma_{Ygps=sg}$:	0.02 / 0.01	m
	$\sigma_{Zgps=sg}$:	0.03 / 0.02	m

- Die Grafiken beziehen sich auf eine Scannerausrichtung rechtwinklig zur Schiffsachse mit einem Kippwinkel von 60°

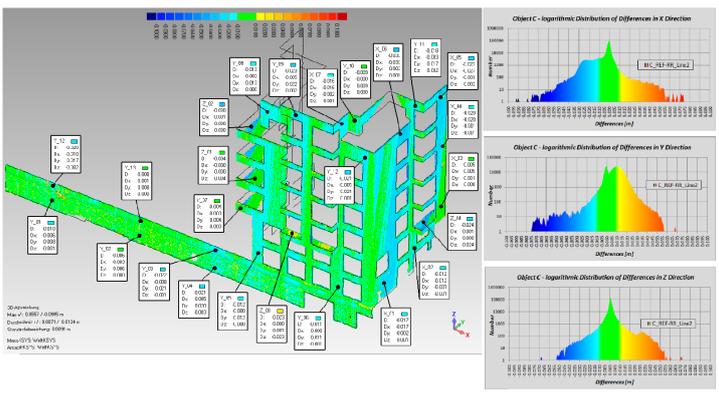


Genauigkeitsbetrachtung – äußere Genauigkeit

- Bestimmung der Testobjekte im Referenzdatensatz



Genauigkeitsbetrachtung – äußere Genauigkeit



Object C - logarithmic Distribution of Differences in X Direction

Object C - logarithmic Distribution of Differences in Y Direction

Object C - logarithmic Distribution of Differences in Z Direction



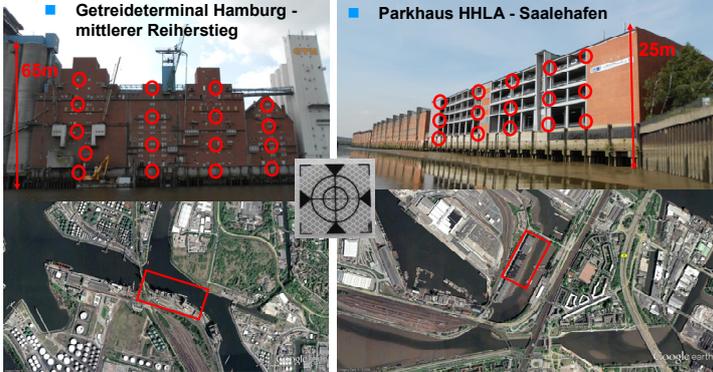
Genauigkeitsbetrachtung – äußere Genauigkeit

- Analyse der 3D-Differenzen
 - Die Mittelwerte der Differenzen in X, Y und Z-Richtung liegen zum Teil deutlich unter 1,5cm, die entsprechenden Standardabweichungen der Differenzen liegen größtenteils unter ± 1 cm
 - Aus den Differenzmodellen wurden Differenzen in X-Richtung (Fahrrichtung des Messschiffes) von maximal $\pm 3,5$ cm bei Objektdistanzen zwischen 50 und 60m detektiert, die zum größten Teil aus der Messgenauigkeit des Kurs- und Positionssensors resultieren
 - Die Differenzen in Y-Richtung von maximal $\pm 2,5$ cm basieren ebenfalls auf der Positionsgenauigkeit, während die Differenzen in Z-Richtung von maximal $\pm 3,5$ cm durch die RTK-Höhenmessgenauigkeit und die Rollwinkelmessgenauigkeit des Messsystems hervorgerufen werden



Genauigkeitsbetrachtung – äußere Genauigkeit

- Aufbau von Referenzpunktfeldern für Feldkalibrierung (geplant)
 - Getreideterminal Hamburg - mittlerer Reiherstieg
 - Parkhaus HHLA - Saalehafen



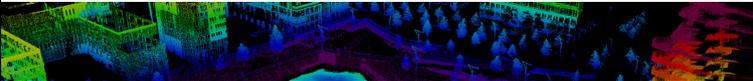
HPA-Workflows für die Scandatenauswertung

- Es wurden die Arbeitsabläufe der folgenden Scandaten Auswertemethoden auf Praktikabilität und Genauigkeit untersucht:
 - Online Prozessierung mit QPS QINSy
 - Postprozessierung mit QPS QINSy
 - Postprozessierung mit RIEGL RiProcess
- Im praktischen Einsatz hat sich die Kombination von QPS QINSy Onlineprozessierung zur Qualitätssicherung im Messgebiet und die nachgeschaltete unabhängige Postprozessierung mit RIEGL inkl. prozessierter INS Trajektorie und Scan Data Adjustment aus qualitativen Gründen für viele Messprojekte durchgesetzt
- Aktuell werden für jedes Scanprojekt aufgrund der relativ hohen Messunsicherheit des Kurses (Heading (1σ) $\pm 0.034^\circ$) Kalibrierfahrten durchgeführt und die Winkelablagen in der Prozessierung mit RIEGL RiProcess im „Scan Data Adjustment“ korrigiert



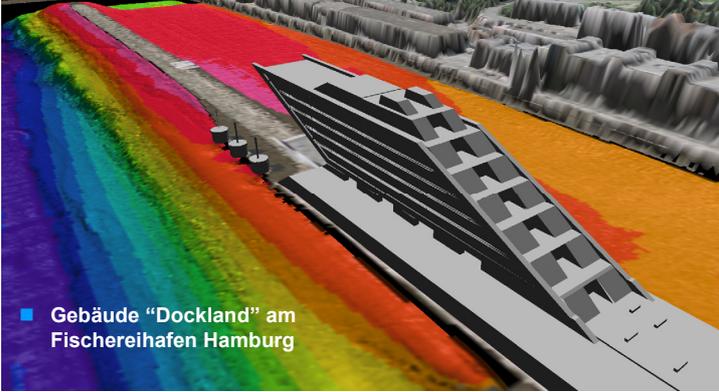
Anwendungen des “Mobile Mapping” bei der HPA

- Folgende Messprojekte werden beispielhaft vorgestellt:
 - Gebäude “Dockland”: Erfassung des Gebäudes durch mobiles Laserscanning; Modellierung der Punktwolken zu 3D-Modell für 3D-Hafenmodell
 - Böschung “Köhlbrand”: Erfassung eines Böschungsabschnittes unter und über Wasser zur Integration von Scan- und Lotungsdaten für Böschungsmonitoring; Erzeugung eines Peilplanes
 - Hafengebiet “Grasbrookhafen”: Erfassung der landseitigen Topographie und der wasserseitigen Bathymetrie zur Erzeugung einer elektronischen Seekarte





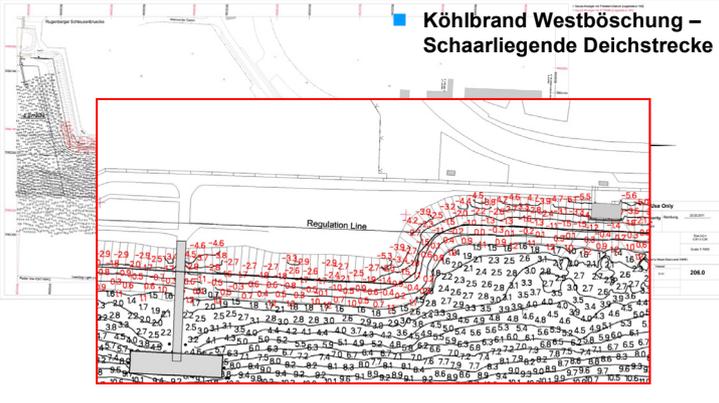
Anwendungen HPA – 3D Modell



- Gebäude "Dockland" am Fischereihafen Hamburg



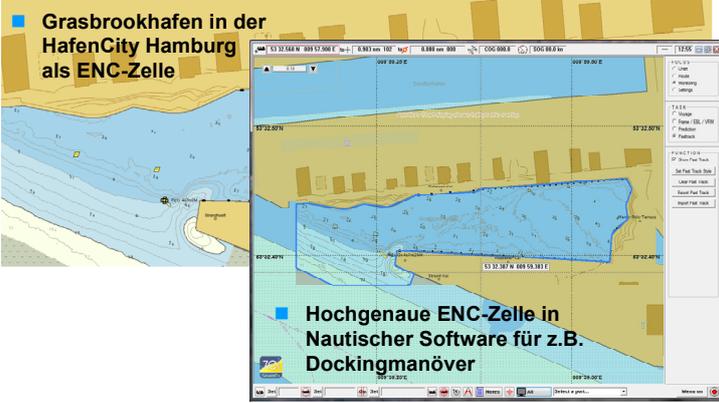
Anwendungen HPA – Überwachung Böschung



- Kühlbrand Westböschung – Schaarliegende Deichstrecke



Anwendungen HPA – ENC-Zelle

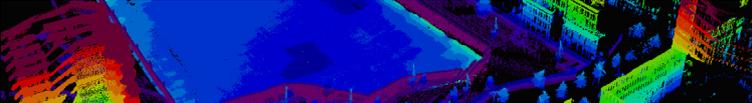


- Grasbrookhafen in der Hafencity Hamburg als ENC-Zelle
- Hochgenaue ENC-Zelle in Nautischer Software für z.B. Dockingmanöver



Weitere Anwendungen:

- In Verbindung mit hochauflösendem Fächerecholot erfolgt die Überwachung von Uferbauwerken: Spundwände, Kaimauern, Böschungen, Vorsätze, HWS-Wände
- Erzeugung von "Lichtraumprofilen" für nautische Belange: Brückendurchfahrten, Oberleitungen
- Durch Verwendung der Scanner-Kamera können georeferenzierte Bilderreihen zur Kontrolle von technischen Bauwerken für das AM im Vorbeifahren erzeugt werden – PortViewApp (geplant)
- Beweissicherungsmessungen bei z.B. Schiffshavarien möglich
- Vegetationskartierung an Uferbereichen möglich
- Positionsstützung über Linien- und Flächenerkennung möglich



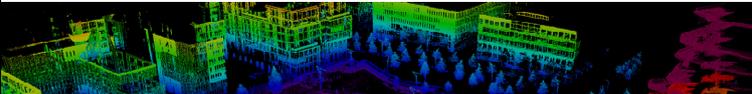
Schlussfolgerungen & Ausblick

- Erfolgreiche Integration eines terrestrischen Laserscanners in das Multisensormessschiff "Deepenschriewer III"
- Genaues Mobile Scanning mittels Offline-Prozessierung erreicht
- Kombination von Laserscanner, Fächerecholot und INS problemlos möglich, wenn Zeitsynchronisierung über GNSS gegeben ist
- Durch die Verwendung von 3D Laserscannern hohe Flexibilität, da das Gerät wasser- und landseitig mobil und ggf. terrestrisch eingesetzt werden kann
- Hohe Messgenauigkeiten von max. $\pm 3,5\text{cm}$ bei Messentfernungen von 50-70m erfordern inertielle Messsysteme höchster Genauigkeit
- Höhere Messgenauigkeiten nur durch Verwendung von genau eingemessenen Passpunkten am Scanobjekt möglich



Schlussfolgerungen & Ausblick

- Zeitaufwand der Datenprozessierung je nach Endprodukt noch groß (>1:4) da manuelle Datenaufbereitung (z.B. Bereinigung von Vegetation in Böschungsbereichen) sehr aufwendig
- Für das performante Verarbeiten und Verteilen der riesigen Punktwolken des mobilen Scannens muss weitere Arbeit in die Evaluation von vorhandenen Datensicherungs- und Datenverteilungslösungen (wie z.B. LFM Server / NetView, RIEGL RiDB, CARIS BDB etc.) investiert werden
- Für spezielle Anwendungen (z.B. Hochgenaue Untersuchung von Spundwänden und Kaimauern) existieren verschiedene 3D Scanning Sonare, die die Lücke zwischen Fächerecholotung und Mobile Scanning schließen...





Kontakt:

Thomas Thies

Hamburg Port Authority AöR

Neuer Wandrahm 1-4

20457 Hamburg

Tel.: 040/ 42847 2849

Fax: 040/ 42847 2048

E-Mail:

Thomas.Thies@hpa.hamburg.de

M. Sc. Hydrography
Dipl.-Ing. (FH) Geomatik

1995-1998

Ausbildung zum Vermessungstechniker in Schwerin

1999-2001

Arbeit in hydrographischem Vermessungsbüro in
Hamburg

2001-2002

Fachoberschule für Bautechnik (Fachhochschulreife)

2003-2007

Studium Geomatik an der Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg

2008-2011

Masterstudium Hydrographie an der HafenCity Uni-
versität Hamburg

seit 2007

zunächst bis 2008 als technischer Administrator in der
Peildatenauswertung der HPA

dann ab 2009 als Leiter der Peildatenerfassung und
technischer Administrator der hydrographischen Mess-
technik auf den „Deepenschriewern I-IV“

ab 2010 stellv. Leiter des Peildienstes der HPA

Aufgabenschwerpunkte (vortragsbezogen):

Untersuchung, Erprobung und ggf. Integration von
neuen hydrographischen Messsystemen
(z. B. hochauflösende Fächerecholote, 3D-Scanning-
sonare, Mehrfrequenzecholotsysteme, Inertiale Mess-
systeme, Mobile LaserScanning) für Anwendungen im
Hamburger Hafen

Integrierte GNSS-INS-Navigationssysteme – Stand der Technik und Entwicklungskonzept

Monika Hentschinski

1 Motivation

Die Aufgabenerledigung in der Gewässervermessung wird in Bereichen mit Brücken und engen Tallagen durch GNSS-Ortungsausfälle erschwert. Alternativ kann in diesen Bereichen derzeit nur die personalintensive Polarortung eingesetzt werden, um ein qualitativ ausreichendes Ergebnis zu erlangen.

Deswegen untersuchte die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) integrierte GNSS-INS-Navigationssysteme, die vom Markt als optimale Lösung für dieses Problem angepriesen werden (HENTSCHINSKI & WIRTH 2012). In diesem Beitrag wird der Stand der Technik dieser Systeme aufgezeigt, sowie ein Lösungskonzept vorgestellt, um solche Systeme in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) einsetzen zu können.

2 Integrierte GNSS-INS-Navigationssysteme

Durch die Kombination verschiedener Messsysteme zu einem „integrierten Navigationssystem“ sollen die Vorteile der Einzelsysteme vereint und die Nachteile möglichst vermieden werden. Es werden die Einzelmesssysteme und das Kalman-Filter, das als Integrationsalgorithmus eingesetzt wird, kurz vorgestellt.

2.1 Inertial Measurement Unit (IMU)

Eine IMU, das Messgerät der Trägheitsnavigation (inertial navigation), ist in sich ein integriertes Messsystem, das aus drei Beschleunigungsmessern (Akzelerometer) und drei Drehratensensoren (Gyroskope) besteht, die jeweils orthogonal zueinander angebracht sind. Aus den gemessenen Beschleunigungen und Drehraten können Geschwindigkeiten und Winkeländerungen berechnet und daraus Positionsveränderungen und Lagewinkel bestimmt werden. Die Vorteile dieses Systems sind die hohe dynamische Genauigkeit, die hohe kontinuierliche Datenrate und dass es autonom, d. h. unabhängig von der Umgebung arbeitet.

Nachteilig ist hingegen, dass die Lösungsungenauigkeit über die Zeit wächst und das System somit nicht langzeitstabil ist. Um der wachsenden Lösungsungenauigkeit entgegen zu wirken, sind regelmäßige Updates (z. B. der Position) zur Bestimmung und Korrektur der vorhandenen Driften notwendig.

2.2 Global Navigation Satellite Systems (GNSS)

Die Funktionsweise der GNSS ist allgemein bekannt und wird an dieser Stelle nicht erläutert. Einige Nachteile die bei der Verwendung von GNSS zur Navigation auftreten können, sind in Abb. 1 zu sehen:

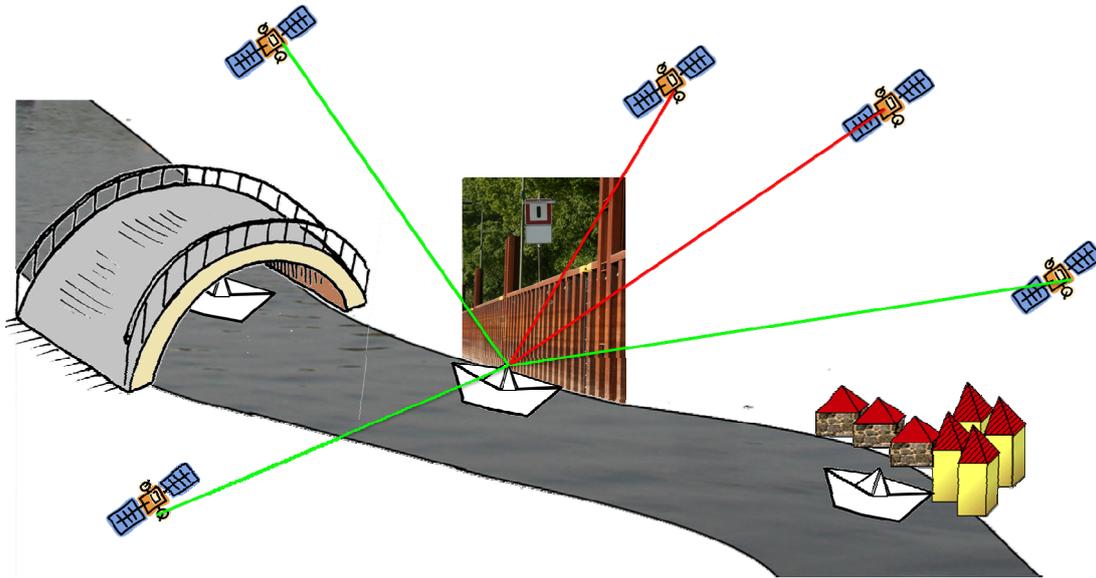


Abb. 1: Kritische Situationen bei der Ortung mit GNSS

In abgeschatteten Bereichen wie bebauten Ufern, Spundwänden, bewachsenen Ufern, etc. ist der Empfang der Satellitensignale nur mit verminderter Qualität möglich. Bei totaler Abschattung, wie unter Brücken, ist keine Ortung mit der nötigen Qualität durchführbar. Vorteil gegenüber der Trägheitsnavigation ist jedoch, dass es langzeitstabil ist und keine Anfangswerte notwendig sind.

2.3 Kalman-Filter

Das Kalman-Filter ist eine effektive und flexibel einsetzbare Methode, um gestörte Sensordaten eines oder mehrerer Messsysteme zu kombinieren und den Zustand des Gesamtsystems bei unsicherer Dynamik (Auftreten von unvorhersehbaren Störungen) zu bestimmen. Der Algorithmus des Kalman-Filters besteht aus den zwei Schritten Korrektur und Prädiktion, die sich ständig wiederholen (siehe auch Schaubild in Abb. 2). Aus dem aktuellen Systemzustand (u. a. aktueller Position) und bekannter Information über das Bewegungsverhalten des Systems wird die Position des nächsten Zeitschritts prädiziert/vorhergesagt. Im nächsten Zeitschritt wird dieser vorhergesagte Wert mit den aktuellen Messwerten korrigiert und dadurch ein optimaler Systemzustand erreicht. Dadurch können sich die Prädiktionsalgorithmen verbessern und die notwendige Korrektur im folgenden Zeitschritt geht gegen null.

Bei einem Updatevorgang müssen nicht zwingenderweise für alle Beobachtungsgrößen neue Messwerte vorliegen. Jedoch wird durch fehlende Messwerte eines Einzelsystems die Redundanz verringert und die Gesamtgenauigkeit des Systems sinkt.

Vorteil des Kalman-Filters gegenüber anderen Filtern ist vor allem die Echtzeitfähigkeit des Filters, da nur die aktuellste Messung verarbeitet werden muss und die bisherige Information in den Variablen des Prädiktors gespeichert ist.

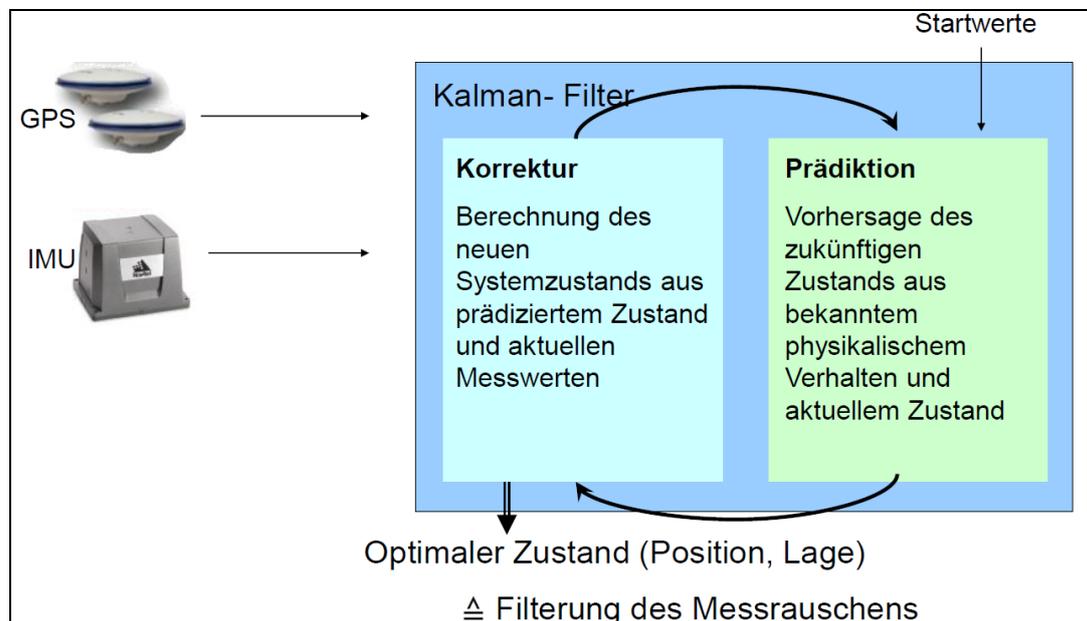


Abb. 2: Schaubild Kalman-Filter

3 Ergebnisse der Untersuchung

Um eventuell nötigen Entwicklungsbedarf für den Einsatz eines integrierten GNSS-INS-Systems in der WSV besser einschätzen und die Beschaffungsspezifikationen dem Stand der Technik anpassen zu können, wurde die Leistungsfähigkeit und Eignung von drei marktgängigen integrierten GNSS-INS-Navigationssystemen untersucht.

Die Untersuchung vor Ort erfolgte mit Unterstützung der WSD Mitte und des WSA Minden auf der „Visurgis“ im Bereich Minden.

In Gebieten, in denen bisher bei Einsatz von GNSS keine Störungen auftraten, entsprach die Genauigkeit der getesteten Systeme nicht ganz dem derzeit eingesetzten GNSS-System. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die ungenauere Systemkomponente INS bei der Echtzeitkopplung die Gesamtgenauigkeit in geringem Maße verschlechtert.

Bei der Analyse der Winkelmessgrößen (Roll, Pitch, Heading) zeigten sich keine signifikanten Abweichungen zwischen den getesteten Systemen. Die Systeme können die bisherigen Sensoren mindestens gleichwertig ersetzen.

In den Bereichen, in denen bisher keine Ortung mit GNSS allein möglich ist, wurde durch die gekoppelten Systeme die Verfügbarkeit insbesondere bei Teilabschattungen und bei einzelnen fehlenden Epochen verbessert. Jedoch ist in anspruchsvollem Gebiet die Bestimmung der Lagekoordinaten mit keinem der Systeme mit ausreichender Genauigkeit möglich.

Keines der Systeme erfüllt die Genauigkeitsanforderungen mit 95 % Sicherheitswahrscheinlichkeit. Die Lücken werden ggf. verkleinert. Da das Ergebnis jedoch mangels geeigneter Integritätskriterien nicht gesichert ist, müssen die Daten weiterhin manuell bereinigt werden.

Das Bearbeiten der Messdaten mit Postprocessing-Software bringt mehr Aufwand als erkennbaren Nutzen. Es können zwar mit viel Aufwand bessere Ergebnisse als in Echtzeit erzielt werden, diese genügen jedoch ebenfalls nicht den Anforderungen.

Keines der hier getesteten Systeme erfüllt damit die Anforderungen in ausreichendem Maße. Auch von anderen marktgängigen Systemen ist keine bessere Leistung zu erwarten, weil die getesteten Systeme nach den Herstellerspezifikationen zur Klasse der hochwertigsten Lösungen gehören.

4 Entwicklungskonzept

Da die marktgängigen Systeme keine qualitätsgesicherte Lösung sicherstellen können, wurde von HENTSCHINSKI & WIRTH (2012) ein Konzept entwickelt, das in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt ist. Nach Umsetzung dieses Konzepts wird qualitätsgesicherte Ortung auch in anspruchsvollen Bereichen möglich sein.

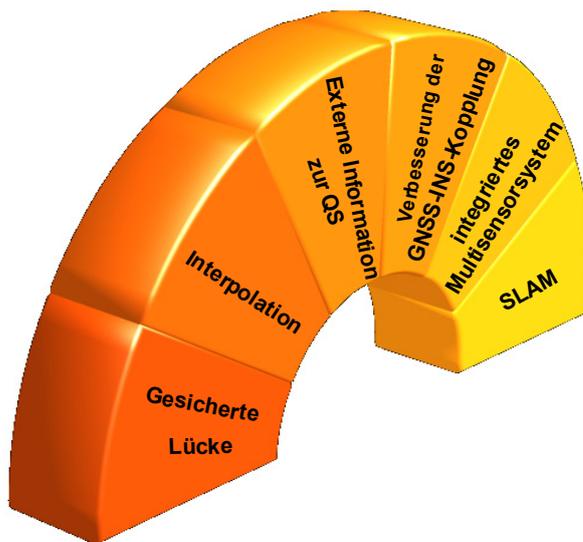


Abb. 3:
Lösungskonzept

Je weiter man auf dem Brückenbogen vorrückt, umso mehr Entwicklungsaufwand steckt in der Verwirklichung. Damit steigen jedoch auch die Qualität und der Mehrwert des Ergebnisses. Die Einzelmaßnahmen werden als Bausteine eines Brückenbogens dargestellt, die sich gegenseitig stützen: Wenn ein Baustein fehlt, ist die Standsicherheit der Brücke nicht mehr gegeben, respektive eine lückenlose qualitätsgesicherte Ortung nicht mehr möglich. Jedoch ist es durchaus möglich und sinnvoll, in der Realisierung manche Bausteine gleichzeitig anzugehen. Zwischen den Bausteinen entstehen dadurch Synergieeffekte: Fertige Steine bilden die Grundlage zur Entwicklung eines neuen Bausteins, der wiederum die Funktion der bestehenden Steine verbessert.

Im Folgenden werden die einzelnen Bausteine der Brücke erläutert:

4.1 Gesicherte Lücke

Die derzeit implementierten Qualitätsindikatoren sind nicht geeignet, um Bereiche mit Lücken aus den Messdaten zu filtern. Es entfallen zwar sehr viele suspekt Daten, jedoch würden darüber hinaus viele Daten verworfen, die eine noch akzeptable Lösung darstellen. Die Information über die Systemintegrität muss deshalb verbessert werden. Es sind Methoden zu entwickeln, mit denen „Lücken“ bzw. fehlerhafte Daten in der Lösung automatisch und sicher erkannt werden. Mögliche Lösungsansätze sind:

- > Verbesserte Qualitätsindikatoren gemeinsam mit Herstellern entwickeln.
- > Bereiche, an denen generell keine Ortung möglich ist, durch Polygone definieren und die Daten bei der Auswertung automatisch löschen.
- > In Bereichen mit zufälligen Ortungsausfällen eine definierte Menge an Daten durch Sicherheitszuschlag vor und nach dem Ausfall löschen.

Der Plausibilisierungsaufwand geht dadurch stark zurück, da fehlerhafte Daten bzw. Daten unzureichender Qualität vermieden werden. Es bleiben jedoch Bereiche mit Lücken bestehen.

4.2 Interpolation

Der zweite Baustein baut auf dem zuvor beschriebenen ersten Baustein „Gesicherte Lücke“ auf. Die erkannten Lücken sollen innerhalb von vom Anwender frei vorgebbaren Grenzen mit wählbaren Methoden durch Interpolation geschlossen werden. Hierbei müssen folgende Punkte beachtet werden:

- > Die erreichbare Qualität hängt einerseits von der Interpolationsmethode ab, die situationsbedingt gewählt werden muss, und andererseits von den begrenzten Approximationsgenauigkeiten der Interpolationsmethode bei beschleunigter Schiffsbewegung.
- > Die Qualität der Sohlinformation ist in den interpolierten Bereichen geringer als in den übrigen Bereichen.
- > Interpolationen sind nur im Postprocessing anwendbar.
- > Die Qualität der Lösung im interpolierten Bereich kann nicht gesichert angegeben werden!

Um eine qualitätsgesicherte Lösung zu erhalten, muss daher mindestens auch der dritte Baustein erarbeitet und eingebaut werden.

4.3 Externe Information zur Qualitätssicherung

In diesem Schritt werden externe Informationen dafür genutzt, die Qualität der Lösung zu überprüfen. Mit Hilfe von Wasserstandsmodellen, Pegelablesungen und einem Squat-Modell können Bereiche definiert werden, innerhalb derer die interpolierte Lösung liegen muss. Von Nachteil ist, dass nur die Höhe mit diesen Grenzwerten überprüft werden kann. Da die kurzfristig auf die Schiffsdynamik wirkenden Störgrößen damit nicht beschrieben werden können, verbleiben Unsicherheiten in der Größenordnung von Sunk und Schwall.

Dieser Baustein verspricht leichte Integrierbarkeit und ist auch in den nächsten Segmenten Erfolg versprechend einsetzbar. Es wird zwar eine qualitätsgesicherte Lösung erreicht, mit der die Anforderungen aber nur in geringem Umfang erfüllt werden.

4.4 Verbesserung der GNSS-INS-Kopplung

Beim vierten Baustein (Verbesserung der GNSS-INS-Kopplung) soll das Filter durch eine Verbesserung der marktgängigen Algorithmen auf den Einsatz im Binnenbereich angepasst werden. Im maritimen Bereich ist prinzipiell eine größere Dynamik zu erwarten, sodass eine Anpassung der Steuerungskomponenten des Kalman-Filters Erfolg versprechend ist.

Mit dem Baustein „Verbesserung der GNSS-INS-Kopplung“ erhält man verbesserte Informationen zur Qualität der gelieferten Lösung. Die erreichte Qualität wird aber weiterhin sehr oft nicht die Anforderungen erfüllen, wie dies von WIRTH (2010) in der Untersuchung des RADARpilot 720°, der für den Binnenbereich konzipiert wurde, bereits gezeigt wurde.

4.5 Integriertes Multisensorsystem

Für eine umfassende echtzeitfähige Lösung des gestellten Problems ist es notwendig, ein integriertes System mit mehr Stützinformation (\triangleq mehr Systemkomponenten) zu entwickeln, sodass man bei einem GNSS-Ausfall nicht nur auf die INS-Lösung angewiesen ist.

Neben Verwendung des Heave und externer Informationen sind weitere Sensoren einzusetzen, wie zum Beispiel Tachymeter für Strecken- und Winkelinformation, Dopplerlog für Geschwindigkeit etc. Durch die Vielzahl der Sensoren kann so die Tragweite eines Ausfalls eines einzelnen Sensors verkleinert werden.

Dieses neue hydrographische Ortungssystem soll die Bewegung des Schiffs im Raum durch ein (zu entwickelndes) dynamisches Modell, das geeignete Sensordaten integriert, lückenlos und qualitätsgesichert beschreiben. Dabei sollen die externen Informationen zur Berechnung des Trends verwendet werden, um die maximale Drift der Höhe einzuschränken. Um die Genauigkeit und Systemintegrität zu jedem Zeitpunkt einfach ablesbar bereitzustellen, sind leistungsfähige und echtzeitfähige statistische Verfahren zur Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanalyse zu entwickeln. Das Ergebnis ist ein funktionsfähiger Prototyp, der die Ortung und Filterung ohne Einsatz von landgestützten personalintensiven Vermessungssystemen lückenlos mit vorgegebener Qualität sicherstellt und als eigenständige Komponente in vorhandene Vermessungssysteme integriert werden kann.

Erst mit Abschluss dieser Entwicklungsstufe kann ein qualitätsgesichertes Ergebnis angegeben werden. Mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit werden die Anforderungen damit erfüllt.

4.6 Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)

Neben der Gewährleistung der Anforderungen könnte das Spektrum der Anwendungen eines Messschiffes dadurch erweitert werden, dass nicht nur die Sohle des Gewässers, sondern auch das ufernahe Gelände (Wasserwechselzone und je nach Offenheit des Geländes Teile der Vorländer) aufgenommen werden.

Dazu muss das integrierte Multisensorsystem zu einem SLAM-System erweitert werden, bei dem gleichzeitig die Umgebung aufgenommen wird. Eine wesentliche Eigenschaft eines SLAM ist es, dass das System sich gleichzeitig aus der zusätzlich gewonnenen Information selbst ortet. Dieser Baustein ist eine Weiterentwicklung des vorigen Bausteins mit dem Mehrwert, dass unter Nutzung eines an Bord montierten Laserscanners oder einer photogrammetrischen Aufnahme mittels CCD-Kamera zusätzlich eine flächendeckende Aufnahme des ufernahen Geländes möglich ist und die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit weiter verbessert wird.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Bei Beschaffungen der WSV sind alle untersuchten Systeme grundsätzlich als gleichwertiger Ersatz der bisherigen Komponenten Kompass, HRP-Sensor und GNSS geeignet. Keines der Systeme erfüllt jedoch die Anforderungen zur Überbrückung der Ortungslücken. Um zumindest eine qualitätsgesicherte Ortung zu ermöglichen, ist der Baustein „Gesicherte Lücke“ und „Interpolation“ möglichst zeitnah umzusetzen.

Um die gestellten Anforderungen zu erreichen und damit letztendlich die landgestützte Polarortung adäquat zu ersetzen, ist es erforderlich, ein integriertes Ortungssystem mit redundanten Komponenten zu entwickeln.

Literatur

HENTSCHINSKI, M., H. WIRTH (2012): Untersuchung integrierter GNSS-INS-Navigationssysteme, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht BfG-1743, Koblenz.

KALMAN, R. (1960): A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, ASME-Journal of Basic Engineering, 82 (Series D) S. 35-45.

WIRTH, H. (2010): Überbrückung von Ortungslücken an BWaStr, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht BfG-1694, Koblenz.



2005-2010

Studium Geodäsie und Geoinformation (Bachelor und Master) an der Technischen Universität München

2010-2012

Wissenschaftliche Angestellte der Bundesanstalt für Gewässerkunde

seit Oktober 2012

Diplomingenieur zur Prüfung und Zertifizierung von Satellitennavigationssystemen bei NavCert GmbH

Kontakt:

M.Sc. Monika Hentschinski

NavCert GmbH

Leopoldstraße 244

80807 München

Tel.: 089/ 20803 9633

E-Mail: monika.hentschinski@navcert.de

Entwicklung von Verfahren zur Verbesserung der Ortung mit Global Navigation Satellite Systems (GNSS)

Annette Scheider und Volker Schwieger

1 Einleitung

Zur Vermessung der Gewässersohle mit auf Vermessungsschiffen installierten Fächerloten muss die Position des Schiffes bzw. des Sensors mit einer möglichst hohen Genauigkeit bekannt sein. Momentan erfolgt die Positionsbestimmung mit GNSS, dessen Empfang während der Messung von der Messumgebung abhängig ist. Insbesondere unter Brücken und im ufernahen Bereich kommt es durch Sichthindernisse zu Abschattungen. Dadurch können teilweise nicht genügend Satellitensignale empfangen werden, so dass die Positionsbestimmung mit GNSS eine schlechte Genauigkeit aufweist oder nicht mehr möglich ist. In diesen Bereichen kann die Positionsbestimmung mittels Trägheitsnavigation verbessert werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die dabei eingesetzte Inertial Measurement Unit (IMU) über längere Zeit Drifteffekte entwickelt. Im Zuge der von HENTSCHINSKI & WIRTH (2012) dargestellten Untersuchung wurde der Einsatz von GNSS-INS-Kopplungen für die Positionsbestimmung vorgestellt. Der Bericht zeigt jedoch deutlich, dass die Positionsqualität in Bereichen mit schlechtem GNSS-Empfang nicht die Anforderungen von 0,3 m in der Lage und 0,1 m in der Höhe erfüllt.

Um auch unter den genannten schwierigen Messbedingungen die Position qualitätsgesichert bestimmen zu können, wurde daher das Projekt HydrOs gestartet.

2 Projekt HydrOs

Mit dem Projekt „Entwicklung von Echtzeit- und Post-Processingverfahren zur Verbesserung der bisherigen Ortung mit Global Navigation Satellite Systems (GNSS) durch Kombination mit weiteren Sensoren sowie hydrologischen Daten“ soll ein Prototyp eines integrierten **Hydrographischen Ortungssystem (HydrOs)** entwickelt werden. Diese Aufgabe wird vom Referat M5 Geodäsie der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und dem Institut für Ingenieurgeodäsie der Universität Stuttgart bearbeitet. Das Projekt unterteilt sich in folgende Phasen:

- > **Phase 1: Wissens- und Datenbasis erarbeiten**
 - detaillierte wissenschaftliche Vorgehensweise

- > **Phase 2: Entwicklung des Systemkonzepts**
 - Systemkonzept mit Zusammenstellung und Bewertung möglicher Sensoren
- > **Phase 3: Entwicklung des Auswertemodells**
 - Auswertemodell
- > **Phase 4: Integration und Realisierung**
 - Prototyp (Hardware/Software) mit geprüfem Auswertemodell
- > **Phase 5: Projektdokumentation, -präsentation und Publikation**
 - Qualitätsgesicherte Dokumentation der Ergebnisse als Grundvoraussetzung für die operationelle Umsetzung

Um GNSS-Ortungslücken schließen zu können und damit eine Echtzeit-Positionslösung in abgeschatteten Bereichen zu erhalten, muss zunächst ein geeignetes Prädiktionsverfahren gewählt werden. Dazu gehört die Entwicklung eines Bewegungsmodells, das sowohl die Lage- als auch die Höhenkoordinaten sowie weitere Zustandsgrößen des Schiffs bestmöglich präzisieren kann. Dieses Modell wird in einen geeigneten Filteransatz, wie beispielsweise das erweiterte Kalman-Filter, integriert. Für die optimale Schätzung der Zustandsgrößen können zusätzlich zum Prädiktionsmodell neben den bereits vorhandenen Sensoren GNSS und IMU zusätzliche Instrumente installiert werden. Außerdem bietet sich die Möglichkeit, bereits vorhandene hydrodynamische Modelle in das Prädiktionsverfahren einzubinden.

Da weder die Entwicklung des Bewegungsmodells noch die vollständige Genauigkeitsanalyse der verschiedenen Integrationsvarianten abgeschlossen ist, kann momentan noch keine endgültige Entscheidung für einen Filteransatz getroffen werden. In diesem Beitrag wird der aktuelle Stand der Untersuchungen vorgestellt.

3 Sensoren und hydrodynamische Modelle

Um, wie bereits erwähnt, eine genaue und zuverlässige Unterstützung von fehlerhaften GNSS-Messungen zu erreichen, sind momentan die Integration der nun folgend aufgeführten zusätzlichen Sensoren und Modelle geplant:

3.1 Messgrößen aus der Schiffssteuerung

Die in diesem Projekt eingesetzten Vermessungsschiffe des „Visurgis“-Typs werden von SCHOTTEL-Ruderpropellern angetrieben. Diese um 360° drehbare Zugpropeller dienen sowohl zur Steuerung wie auch als Antrieb des Schiffs (siehe SCHOTTEL 2012). Um die Bewegung des Schiffs präzisieren zu können, werden die Ausrichtung des Propellers in Relation zur Ausrichtung des Schiffs und indirekt die angelegte Geschwindigkeit erfasst. Die Geschwindigkeit des Schiffs soll über die Drehzahl des Propellers bestimmt werden. Eine entsprechende Abgriffseinrichtung wird zurzeit eingebaut.

3.2 Zusätzlich stützende Sensoren

Doppler Velocity Log (DVL)

Das am Schiff befestigte DVL bestimmt die Geschwindigkeit des Schiffs über die detektierte Frequenzverschiebung der ausgesendeten akustischer Signale relativ zum reflektierenden Medium (vgl. SHAW et al. 1991). Bei einer Reflektion an der Gewässersohle kann die Geschwindigkeit über Grund mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2 \% \pm 0,1 \text{ cm/s}$ (Teledyne RD

Instruments 2012) bestimmt werden. Dienen hingegen Wasserpartikel als reflektierendes Medium, so wird die Geschwindigkeit relativ zur Strömung berechnet. Dabei wird dieselbe Genauigkeit wie über Grund erreicht. Für dieses Projekt soll ein DVL des Typs Workhorse Navigator der Firma Teledyne RD Instruments installiert werden.

Barometer

Mithilfe der barometrischen Höhenformel kann aus dem Luftdruck die Höhendifferenz eines Sensors zu einer Referenzfläche bestimmt werden. Die Erdbeschleunigung, die Dichte der Luft und der Druck auf Referenzhöhe müssen dazu bekannt sein (vgl. MÖLLER 1973).

Mit den aktuell auf dem Markt befindlichen Systemen (vgl. Vaisala 2012; ParoScientific 2012) kann eine absolute Höhengenaugigkeit im Bereich von 1 m erreicht werden. Dies erfüllt nicht die Anforderungen des Projekts. Deshalb soll untersucht werden, ob sich die Kurzzeitstabilität ausnutzen lässt und die Höhendifferenzen zwischen zwei Messungen aus den Luftdruckdifferenzen mit einer höheren Genauigkeit detektiert werden können.

Da auch der Wind die Geschwindigkeit des Schiffes beeinflussen kann, sollen Windstärke und -richtung erfasst und der Einfluss im Bewegungsmodell berücksichtigt werden.

3.3 Geodätische Sensoren

Tachymeter

Als zusätzlicher Positionssensor können auf dem Schiff Tachymeter installiert werden. Hierbei sollte es sich um Robot-Tachymeter handeln, die selbständig ein bewegtes Ziel verfolgen können. Entsprechende Tachymeter werden von zahlreichen Herstellern angeboten (z. B. bei Leica Geosystems 2012, Trimble 2012 oder Topcon 2012) und können Winkelgenauigkeiten von bis zu 0,15 mgon und Streckengenauigkeiten von deutlich besser als 1 cm erreichen.

Laserscanner

Mithilfe von „Simultaneous Localization and Mapping“-Algorithmen (SLAM) könnten auch terrestrische Laserscanner als Positionssensoren eingesetzt werden. Beispiele hierfür finden sich u. a. in HERZBERG et al. (2012), VENNEGEERTS (2011) und BORRMANN et al. (2008).

3.4 Hydrodynamisches Modell

Im WQV¹-Modell der BfG können das Abflussverhalten, die Wasserspiegellage und der Wasserdurchfluss bzw. eindimensionale Fließgeschwindigkeiten für Flüsse und Kanäle in Deutschland modelliert werden. Da Wasserspiegellage und Fließgeschwindigkeiten vom Wasserabfluss abhängig sind, muss zuerst das aktuelle Wasserabfluss-Szenario bestimmt werden, bevor die Daten im Filter verwendet werden dürfen. Dies kann durch eine Abfrage eines in der Nähe erfassten Pegelstands erfolgen. Da lediglich die Fließgeschwindigkeiten, aber keine Angaben zur Fließrichtung vorliegen, sind die Modelldaten allein für die Modellierung der Schiffsbewegung nicht ausreichend.

¹ WQV: Water Quality Volume

4 Bewegungsmodell und Sensorintegration

Die horizontale Bewegung eines vorwärts fahrenden Landfahrzeugs lässt sich, wie in EICHORN (2005) und in BEETZ (2012) beschrieben, für geradlinige Trajektorien durch ein Geradenmodell und für alle anderen Trajektorien durch ein Kreismodell modellieren. Dabei hat neben den angelegten Steuergrößen vor allem der Schlupf einen Einfluss auf die Form der Trajektorie. Nach FOSSEN (1994) ist anzunehmen, dass das Bewegungsverhalten von Schiffen auf Binnengewässern hingegen durch die Strömung und den Wind beeinflusst wird. Diese Größen müssen im Bewegungsmodell berücksichtigt werden, da es sonst nach einer GNSS-Lücke zu einem Offset zwischen GNSS-Lösung und modellierter Position kommt. Der Einfluss unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten und Anströmwinkel auf eine simulierte kreisförmige Trajektorie wird in Abb. 1 dargestellt. Aus diesem Grund ist geplant, dass weitere Sensoren auf den Vermessungsschiffen installiert werden, die zusätzlich zu den angelegten Steuergrößen weitere Größen (vgl. Abschnitt 3.2), beispielsweise die Fließgeschwindigkeit, erfassen.

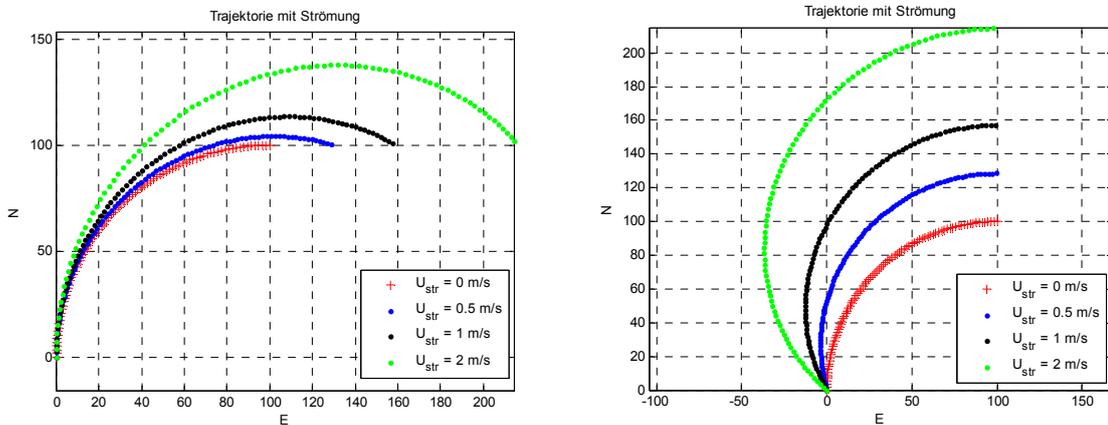


Abb. 1: Kreisförmige Trajektorie mit Strömung (a) entlang der Anfangsfahrtrichtung und (b) quer zur anfänglichen Fahrtrichtung, U_{str} = Strömungsgeschwindigkeit

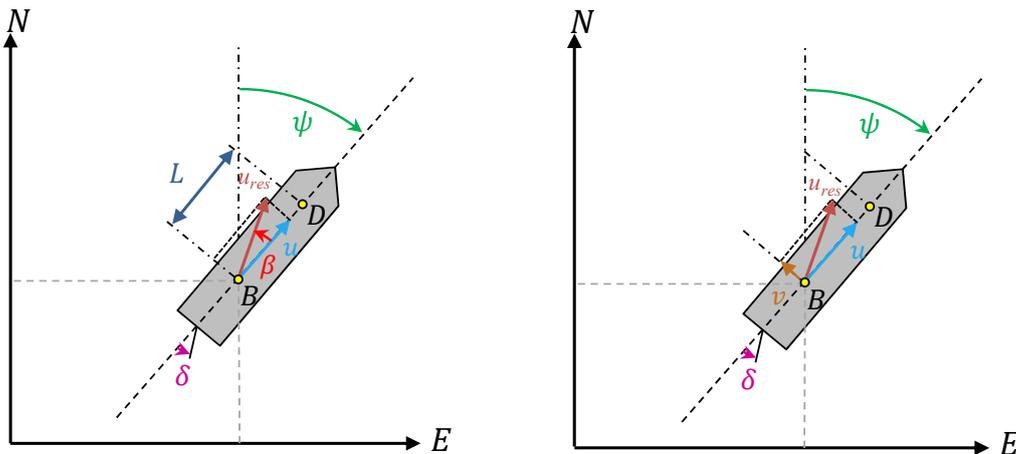


Abb. 2: Modellierung der zweidimensionalen Schiffsbewegung mit (a) dem erweiterten Nomoto-Modell mit Driftzustand nach ZIMMERMANN (2000) und (b) dem Modell nach Davidson und Schiff

In der Literatur (vgl. FOSSEN 1994, 2011 und ZIMMERMANN 2000) finden sich einige erfolgreich getestete Schiffsbewegungsmodelle. So werden lineare Bewegungsmodelle wie das Nomoto-Modell erster Ordnung und das Modell nach Davidson und Schiff aufgeführt. In beiden Fällen wird bei einer konstanten Längsgeschwindigkeit die Bewegung des Schiffes modelliert. Im erweiterten Nomoto-Modell mit Driftzustand nach ZIMMERMANN (2000) werden die Änderung des Headingwinkels ψ und der Driftwinkel β in Abhängigkeit vom Ruderwinkel δ bestimmt (siehe Abb. 2). Das Modell nach Davidson und Schiff verwendet statt des Driftwinkels die Quergeschwindigkeit v . Für beide Modelle werden in ZIMMERMANN (2000) auch Ansätze zur Berücksichtigung der Strömung aufgezeigt. Außerdem werden in FOSSEN (1994) und in FOSSEN (2011) verschiedene nichtlineare Modelle und gekoppelte Modelle (Gier- und Rollwinkel) vorgestellt, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen wird. Alle diese Modelle beschreiben nur die Bewegung in der Horizontalebene. Die für das Projekt HydrOs notwendige Höhenkomponente wird nicht berücksichtigt. Außerdem gehen die Modelle von Schiffen mit einem Rumpf aus, die durch ein Ruder gesteuert werden. Bei den im Projekt eingesetzten Vermessungsschiffen handelt es sich aber um Katamarane, die von Ruderpropellern angetrieben werden. Die „Visurgis“ kommt dabei mit einem Propeller aus, während die neuen Schiffe wie die „Hildegard von Bingen“ mit zwei Propellern ausgestattet sind. Dadurch entspricht das Bewegungsverhalten der Schiffe wahrscheinlich nicht mehr dem mit den existierenden Modellen prädizierten Verhalten. Diese müssen entsprechend angepasst werden bzw. es müssen neue Modelle entwickelt werden.

5 Kalman-Filter

Um die Beobachtungen und die prädizierten Positionen miteinander zu koppeln, werden beide in ein Filter eingebunden. Ein geeigneter Ansatz hierfür ist beispielsweise das in GELB (1974) und RAMM (2008) beschriebene (erweiterte) Kalman-Filter. Bei linearen Beobachtungen und linearer Prädiktion kann das Kalman-Filter eingesetzt werden, wohingegen im nichtlinearen Fall das erweiterte Kalman-Filter verwendet wird. Durch das Kalman-Filter werden beobachtete Messgrößen und mithilfe des Bewegungsmodells prädizierte Zustandsgrößen so miteinander gekoppelt, dass der Systemzustand optimal geschätzt werden kann. Können einzelne Messgrößen durch Ausfall des Sensors nicht bestimmt werden (z. B. bei abgeschatteter GNSS-Antenne), so kann diese Größe prädiziert werden, wodurch die Schiffsposition trotzdem berechnet werden kann. Sind wieder Messgrößen dieses speziellen Sensors verfügbar, findet erneut eine Schätzung des optimalen Systemzustands statt, wodurch eine Positionskorrektur durchgeführt wird.

Mit einem geeigneten Bewegungsmodell sollen die GNSS-Lücken geschlossen werden, wobei eine Positionsgenauigkeit im Bereich weniger Dezimeter erreicht werden soll. Werden die oben genannten Sensoren und hydrodynamischen Modelle in das Messsystem integriert, so werden die in Tabelle 1 gezeigten Messgrößen erfasst; ebenso sollten zumindest die nachfolgend dargestellten Zustandsgrößen modelliert werden. Tabelle 1 führt die möglichen Sensoren zur Erfassung der Messgrößen mit auf.

Es gibt verschiedene Analysemöglichkeiten, um die erfolgversprechendste Integrationsvariante für die Installation der Sensoren zu detektieren. Eine Methode ist die Monte-Carlo-Simulation, bei der Messgrößen beliebiger Verteilungen simuliert werden. Diese Messgrößen stellen die Eingangsgrößen des Kalman-Filters dar. Wird dieser Vorgang für eine Trajektorie

oft genug wiederholt ($n \geq 10.000$), so kann die theoretische Standardabweichung der Ausgangsgrößen, hier der Zustandsgrößen des Kalman-Filters, berechnet werden. Damit ist eine erste Aussage über die mit dieser Variante realisierbare Genauigkeit möglich. Das Verfahren wird als Varianzanalyse bezeichnet. Werden einzelne Varianzanteile zu jeder Eingangsgröße geschätzt, so wird von einer Varianz-basierten Sensitivitätsanalyse gesprochen (SCHWIEGER 2005 und SALTELLI et al. 2004). Um beispielsweise eine Geradeausfahrt zu modellieren, wurde ein adaptiertes geometrisches 3D-Modell nach BEETZ (2012) und FOSSEN (2011) eingesetzt, bei dem die Quergeschwindigkeit noch nicht berücksichtigt wird.

Tabelle 1

Beispiel für die im Kalman-Filter enthaltenen Größen um die Schiffsposition abschätzen zu können

Messgrößen		Zustandsgrößen			
$l =$	N	Hochwert - GNSS, Tachymeter, Laserscanner	$\hat{x} =$	\hat{N}	Hochwert
	E	Rechtswert - GNSS, Tachymeter, Laserscanner		\hat{E}	Rechtswert
	D	Höhe - GNSS, Tachymeter, Laserscanner		\hat{D}	Höhe
	φ	Roll - IMU, DVL		$\hat{\phi}$	Roll
	θ	Pitch - IMU, DVL		$\hat{\theta}$	Pitch
	ψ	Heading - IMU, DVL		$\hat{\psi}$	Heading
	Δz	Hub - IMU		\hat{u}_{abs}	Längsgeschwindigkeit
	u	Längsgeschwindigkeit - DVL, Steuerung		\hat{v}_{abs}	Quergeschwindigkeit
	v	Quergeschwindigkeit - DVL, Steuerung		\hat{w}_{abs}	Hubgeschwindigkeit
	w	Hubgeschwindigkeit - DVL		S	Squat
	u_{Str}	Strömungsgeschwindigkeit L - DVL			
	v_{Str}	Strömungsgeschwindigkeit Q - DVL			
	U_{Wind}	Windgeschwindigkeit - Windmesser			
	γ_{Wind}	Windrichtung - Windmesser			
	p	Luftdruck - Barometer			
	W	Wasserspiegellage - hydrdyn. Modell			

6 Zusammenfassung und Ausblick

Um die Position eines Vermessungsschiffes auch in abgeschatteten Bereichen mit einer Genauigkeit von wenigen Dezimetern bestimmen zu können, wird zunächst ein Bewegungsmodell benötigt, das sowohl die Lage- als auch die Höhenkomponente umfasst. Darin werden nicht nur die am Schiff angelegten Steuergrößen zur Prädiktion der Geschwindigkeit modelliert, sondern auch möglichst viele weitere Größen, so dass die Schiffsbewegung vorhergesagt werden kann. Zusätzliche Sensoren auf den Schiffen ergänzen daher die bereits vorhandenen GNSS-Empfänger und IMUs. Um die vielversprechendste Integrationsvariante der Sensoren zu finden, müssen Varianz- und Sensitivitätsanalyse der verschiedenen Integrationsvarianten durchgeführt werden.

Nachdem die Entscheidung für eine Variante gefallen ist, die in Kombination mit dem dazu entwickelten Bewegungsmodell eine möglichst hohe Positionsgenauigkeit erreicht, wird ein detailliertes Systemkonzept entwickelt. Dazu muss sowohl die Hardware- als auch die Softwarearchitektur des integrierten hydrographischen Ortungssystems festgelegt werden, so dass daraus ein Prototyp entwickelt werden kann. Ist dieser Prototyp auf einem Vermessungsschiff installiert, können erste Messungen durchgeführt werden. Mit den Messdaten schließlich kann das Ortungssystem und insbesondere das Bewegungsmodell evaluiert und optimiert werden.

Literatur

- BEETZ, A. (2012): Ein modulares Simulationskonzept zur Evaluierung von Positionssensoren sowie Filter- und Regelalgorithmen am Beispiel des automatisierten Straßenbaus. Dissertation, Universität Stuttgart, DGK, Reihe C, Nr. 688, München.
- BORRMANN, D., J. ELSEBERG, K. LINGEMANN, A. NÜCHTER, J. HERTZBERG (2008): Globally consistent 3D mapping with scan matching. *Robotics and Autonomous Systems*, 56: 130-142.
- EICHHORN, A. (2005): Ein Beitrag zur Identifikation von dynamischen Strukturmodellen mit Methoden der adaptiven KALMAN-Filterung. Dissertation, Universität Stuttgart, DGK, Reihe C, Nr. 585, München.
- FOSSEN, T. I. (1994): *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons, Chichester, England.
- FOSSEN, T. I. (2011): *Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons, Chichester, England.
- GELB, A. (1974): *Applied Optimal Estimation*. The M.I.T Press, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts und London, England.
- HENTSCHINSKI, M., H. WIRTH (2012): Untersuchung integrierter GNSS-INS-Navigations-systeme, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht BfG-1743, Koblenz.
- HERZBERG, J., K. LINGEMANN, A. NÜCHTER (2012): *Mobile Roboter: Eine Einführung aus der Sicht der Informatik*. Springer Verlag, Berlin.
- MÖLLER, F. (1973): *Einführung in die Meteorologie – Band 1*. BI Hochschultaschenbücher, Band 276, B.I.-Wissenschaftsverlag, Mannheim.
- RAMM, K. (2008): Evaluation von Filter-Ansätzen für die Positionsschätzung von Fahrzeugen mit den Werkzeugen der Sensitivitätsanalyse. Dissertation, Universität Stuttgart, DGK, Reihe C, Nr. 619, München.
- SALTELLI, A., S. TARANTOLA, F. CAMPOLOGNGO, M. RATTO (2004): *Sensitivity Analysis in Practice – A Guide to Assessing Scientific Models*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- SHAW, P. T., A. P. STEVENS, A. MARINO (1991): Patent US 5077700 (31.12.1991), United States of America, Secretary of the Navy – Doppler Velocity Profiler.
- SCHWIEGER, V. (2005): Nicht-lineare Sensitivitätsanalyse gezeigt an Beispielen zu bewegten Objekten. Habilitation, Universität Stuttgart, DGK, Reihe C, Nr. 581.
- VENNEGEERTS, H. (2011): Objektraumgestützte kinematische Georeferenzierung für Mobile-Mapping-Systeme. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, DGK, Reihe C, Nr. 657, München.
- ZIMMERMANN, R. (2000): Repräsentation dynamischer Schiffsmodelle in einem Navigationssystem für die Binnenschifffahrt. Dissertation, Universität Stuttgart, Logos Verlag, Berlin.

Internetzugriffe:

Leica Geosystems (2012): www.leica-geosystems.de/de/Totalstationen-TPS_4207.htm (Stand 17.12.2012)

ParoScientific (2012): Intelligent Transmitters – Series 1000, 6000 & 9000, www.paroscientific.com/pdf/intransmitters.pdf (Stand 17.12.2012)

SCHOTTEL (2012): SCHOTTEL Ruderpropeller – Das überlegene Antriebssystem http://www.schottel.de/fileadmin/data/pdf/deu/deu_SRP.pdf (Stand 17.12.2012)

Teledyne RD Instruments (2012): Workhorse Navigator – Doppler Velocity Log (DVL), www.rdinstruments.com/pdfs/wh_navigator_ds_lr.pdf (Stand 17.12.2012)

Topcon (2012): www.topcon-positioning.eu/76/85/products.html (Stand 17.12.2012)

Trimble (2012): www.trimble.com/survey/Total-Stations.aspx (Stand 17.12.2012)

Vaisala (2012): PTB330 Digital Barometer for Professional Meteorology, Aviation and Industrial Users, www.vaisala.de/de/products/pressure/Pages/PTB330.aspx (Stand 17.12.2012)



Kontakt:

Dipl.-Ing. Annette Scheider
Institut für Ingenieurgeodäsie,
Universität Stuttgart
Geschwister-Scholl-Str. 24D
70174 Stuttgart
Tel.: 0711/ 6858 4057
Fax: 0711/ 6858 4044
E-Mail:
annette.scheider@ingeo.uni-stuttgart.de

Jahrgang: 1984

2004-2010

Studium Geodäsie und Geoinformatik, Universität
Stuttgart

seit 2010

Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für
Ingenieurgeodäsie

Projektbearbeitung:

seit 2012: Entwicklung von Echtzeit- und Post-
processingverfahren zur Verbesserung
der bisherigen Ortung mit Global Na-
vigation Satellite Systems (GNSS)
durch Kombination mit weiteren Sen-
soren sowie hydrologischen Daten



Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schwieger
Institut für Ingenieurgeodäsie,
Universität Stuttgart
Geschwister-Scholl-Str. 24D
70174 Stuttgart
Tel.: 0711/ 6858 4041
Fax: 0711/ 6858 4044
E-Mail:
volker.schwieger@ingeo.uni-stuttgart.de

Jahrgang: 1964

1983-1989

Studium der Geodäsie an der Universität Hannover

1998

Promotion zum Dr.-Ing. an der Universität Hanno-
ver, Geodätisches Institut

2004

Habilitation an der Universität Stuttgart, Institut für
Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen

seit 2010

Direktor des Instituts für Ingenieurgeodäsie der
Universität Stuttgart (IGS)

Detektion von Sedimentschichten an Bundeswasserstraßen

Jens Wunderlich, Sabine Müller und Peter Hümbs

1 Einleitung

In den Vorhäfen und Binnenhäfen Brunsbüttel wird die geforderte Solltiefe über Nassbaggerarbeiten sichergestellt. Diese Baggerungen werden monatlich durch Gewässervermessungen überprüft. Die Vorhäfen sind elbseitig durch eine Barre begrenzt, hinter der in Richtung der Schleusen eine Sprungschicht in der Wassersäule vorhanden ist. Im NOK selbst, von Kilometer 1,6 bis Kilometer 5,8 befinden sich unterschiedliche Weichsedimente, bei denen die nautische Sohle in den Vermessungsdaten oft nicht eindeutig zu erkennen ist.

Das zur Vermessung eingesetzte Peilschiff ORKA verfügt über ein Zweifrequenz-Mehrfachschwingersystem (Kongsberg EA-MCU) mit 16 200 kHz-Kanälen und vier 15 kHz-Kanälen. Für die Vorhäfen und Binnenhäfen werden standardmäßig nur die vier 15 kHz-Schwinger des Messsystems genutzt. Mit dieser Frequenz springt im Außenbereich die digitalisierte Wassertiefe zwischen Schwimmschicht und dem darunter liegenden Gewässergrund. Im Binnenbereich werden verschiedene Horizonte einer Sedimentsuspension erfasst. In beiden Fällen ist die Wassertiefe nicht eindeutig zuzuordnen.

Bei der Auswertung der Daten und Erstellung der Peil- und Baggerpläne durch das verantwortliche Peilbüro Tönning ist ein erheblicher manueller Aufwand erforderlich. Die online ermittelten Tiefen weisen oft eine große Streuung auf, sie müssen einzeln mit dem Echogramm verglichen und korrigiert werden. In den Echogrammen sind mehrere Horizonte zu erkennen und es ist somit nicht eindeutig festzustellen, wo die relevante nautische Tiefe liegt. Die ermittelten Tiefen weisen eine große Unsicherheit auf, siehe Abb. 1.

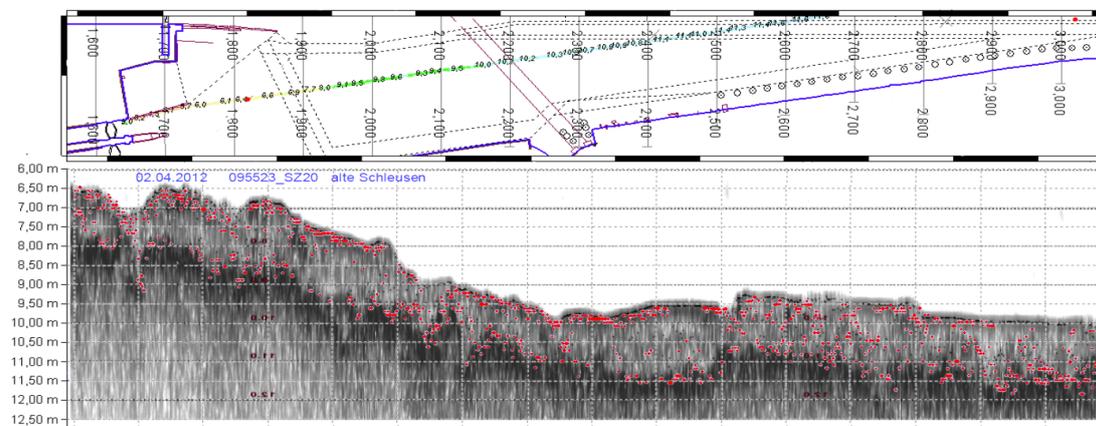


Abb. 1: Echogrammbeispiel mit digitalisierter Sohlentiefe (EA-MCU, 15 kHz) aus dem Bereich der Alten Schleusen Brunsbüttel

Die Ermittlung der nautischen Sohle, insbesondere in hydroakustisch schwierigen Gebieten, ist seit langem Gegenstand verschiedener Untersuchungen (LIEBETRUTH & EIBFELDT 2011). Zur Lösung des oben dargestellten Problems hat die WSD Nord ein Projekt „Ermittlung der nautisch relevanten Sohle in hydroakustisch schwer zu vermessenden Gebieten – Entwicklung eines praxistauglichen Verfahrens im Bereich Vorhafen/Binnenhafen Brunsbüttel“ initiiert. Zunächst wurde das Messgebiet im August 2012 mit dem vorhandenen Messsystem EA-MCU und gleichzeitig mit einem parametrischen Sedimentecholot der Firma INNOMAR vermessen. Diese Messungen sollten folgende Fragen beantworten:

- > Ist das Sedimentecholot in das Messsystem des Peilschiffs ORKA integrierbar?
- > Durchdringt das Sedimentecholot die Suspensionsschicht und werden die verschiedenen akustischen Horizonte sicher erfasst?·
- > Welche Anforderungen sind an den Auswerteprozess zu stellen?
- > Welche Möglichkeiten und Grenzen der automatisierten Auswertung gibt es?

In einer zweiten Phase sollen die akustischen Messdaten mit geophysikalischen Parametern korreliert werden. Anschließend ist eine praxistaugliche Strategie zur revierbezogenen Festlegung des nautischen Horizonts und Korrelation mit den detektierten akustischen Horizonten sowie Umsetzung eines effizienten Auswerteverfahrens festzulegen.

2 Messsysteme und Datenauswertung

Die Vergleichsmessungen der Projektphase 1 fanden im August 2012 statt. In den Vorhäfen, im Schleusenbereich und in den Binnenhäfen wurden Längs- und Querprofile gefahren. Für diese Messungen wurde das parametrische Sedimentecholot „SES-2000 *standard*“ in das Messsystem des Peilschiffes ORKA integriert, siehe Abb. 2. Der Schallwandler wurde im Bugbereich zwischen den Rümpfen montiert. Das EA-MCU wurde mit den im Rumpf befindlichen zwei 15 kHz-Wandlern und acht 200 kHz-Wandlern genutzt.

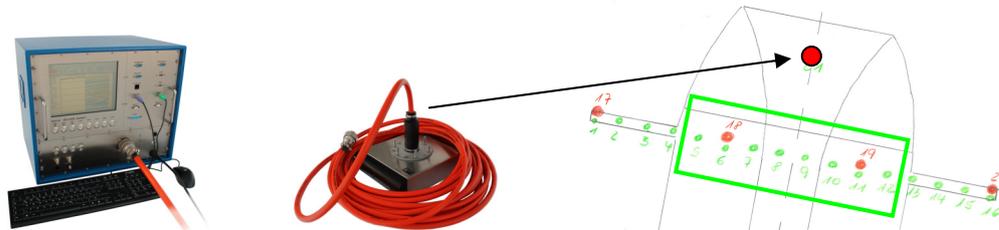


Abb. 2: Verwendete Messtechnik: SES-2000 *standard* (links) mit Schallwandler (Mitte), der am Bug zwischen den Rümpfen positioniert wurde. Das EA-MCU wurde mit den Wandlern Nummer 5-12 (200 kHz) und 18-19 (15 kHz) verwendet (rechts, grüner Kasten)

Tabelle 1

Vergleich wichtiger technischer Daten der eingesetzten Messsysteme

	Innomar SES-2000 <i>standard</i>	Kongsberg EA-MCU
Frequenzen	100 kHz / 4-15 kHz	200 kHz / 15 kHz
Schichtauflösung bei 15 kHz	bis 5 cm	bis 10 cm
Pulsrate	bis 60 s ⁻¹	bis 64 s ⁻¹
Halbwertsbreite	4° (alle Frequenzen)	9° (200 kHz) / 17° (15 kHz)
Footprint 15 kHz @ 12 m Tiefe	ca. 0,6 m ²	ca. 10 m ²

Beide Messsysteme lieferten eine online digitalisierte Wassertiefe (Bottom Track). Die SES-2000-Daten wurden im Anschluss an die Vermessung von INNOMAR ausgewertet. Dazu wurden die Wassertiefen beider Kanäle (100 kHz und 12 kHz/15 kHz) automatisch digitalisiert. Zum Vergleich wurden die automatisch ermittelten Tiefenwerte manuell bereinigt. Die Daten des EA-MCU werden vom Peilbüro Tönning so bearbeitet, wie die monatlichen Peilungen. Anschließend sollen beide Datensätze hinsichtlich der Qualität der Tiefenwerte und des Arbeitsaufwandes verglichen werden.

3 Grundlagen der Echolotung und Wassertiefenbestimmung

Die Bestimmung der Wassertiefe (Übergang zur Suspension oder zur festen Sohle) ist eine wesentliche Aufgabe im Projekt. Daher werden die Grundlagen hier kurz dargestellt.

Trifft eine Schallwelle auf eine Grenzfläche, an der sich die akustische Impedanz $Z = \rho \cdot c$ (ρ - Dichte, c - Schallgeschwindigkeit) ändert, kommt es zu Reflexionen und Rückstreuungen des Schalls, die als Echos empfangen werden. Dabei ist es gleichgültig, ob sich Dichte oder Schallgeschwindigkeit oder beide Parameter ändern. Die Amplitude des Empfangssignals (Echostärke) wird bestimmt durch den Reflexions-Koeffizienten R . Bei senkrechtem Schalleinfall auf eine ebene Grenzfläche gilt:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\Delta Z}{\Sigma Z}, \text{ mit } Z_1, Z_2 - \text{Impedanzen der Schichten.}$$

Die Echostärke ist jedoch nicht nur von den Impedanzunterschieden, sondern auch von der Struktur, d. h. von der Rauigkeit der Grenzflächen bezogen auf die Wellenlänge, abhängig. Die Entfernung z einer Schichtgrenze (z. B. die Wassertiefe) wird aus der Echolauftzeit t bei bekannter Schallgeschwindigkeit c berechnet: $z = c \cdot t / 2$.

Schallwellen werden im Wasser und im Boden gedämpft und die Echostärken der Schichtechos verringern sich mit wachsenden Entfernungen und Schichtdicken. Die Dämpfung ist abhängig vom Material und wächst mit steigender Frequenz. Verringert sich die Echostärke, werden die Einflüsse akustischer Störungen immer größer. Dadurch wird die Eindringung begrenzt.

Schall wird bei Flächenstrahlern als Keule gesendet. Die Halbwertsbreite der Schallkeule ist der Winkelbereich des Schallwandlers, bei dem die abgestrahlte Leistung auf die Hälfte gesunken ist. Die Halbwertsbreite der Schallkeule ist den Schallwandlerabmessungen und der Frequenz umgekehrt proportional.

Das Echo resultiert aus der Summe aller Teilechos innerhalb der Schallkeule, die an den beschallten Flächen und Objekten entstehen. Die horizontale Auflösung verringert sich daher, wenn sich Halbwertsbreite oder Bodenabstand vergrößern.

Die maximale vertikale Auflösung wird durch die Bandbreite B des Sendepulses bestimmt: $\Delta z = c / 2B$. (LURTON 2002)

Zur Detektion des Echos einer Grenzschicht (z. B. Bestimmung der Wassertiefe) wird eine bestimmte Amplitude als Schwellwert definiert. Wird das Empfangssignal größer als dieser Schwellwert, wird diese Laufzeit als Wassertiefe registriert. Meist werden zur Qualitätssicherung weitere Merkmale (Echolänge, Historie der Wassertiefenwerte) ausgewertet und ein neuer Tiefenwert nur akzeptiert, wenn alle Kriterien erfüllt sind.

4 Grundlagen der parametrischen Akustik/Vorteile zur Bestimmung der Wassertiefe

Parametrische (nichtlineare) Sedimentecholote nutzen den sogenannten parametrischen akustischen Effekt zur Schallerzeugung. Werden Schallwellen mit hohem Schalldruck erzeugt, erfolgt durch nichtlineare Ausbreitungsbedingungen im Wasser eine Deformation der Schallwelle. Werden zwei Signale mit ähnlichen Frequenzen f_1 und f_2 (Primärfrequenzen mit $f_1 < f_2$; $f_2/f_1 \approx 1$) gleichzeitig mit hohem Schalldruck abgestrahlt, interagieren diese Schallwellen im Wasser. Dabei entstehen neue Frequenzkomponenten (sog. Sekundärfrequenzen), vor allem die Summe und die Differenz der ausgestrahlten (Primär-)Frequenzen (NOVIKOV et al. 1987).

Die Differenzfrequenz $F = |f_2 - f_1|$ (4-15 kHz beim SES-2000 *standard*) kann in den Sedimentkörper eindringen. Die am Seeboden reflektierten Primärwellen (ca. 100 kHz beim SES-2000 *standard*) können zur genauen Bestimmung der Wassertiefe genutzt werden.

Das Differenzfrequenz-Signal weist gegenüber konventionell generierten Signalen einige vorteilhafte Eigenschaften auf. Die Wichtigste ist die stark gebündelte niederfrequente Schallkeule, deren Halbwertsbreite der Breite der Primärschallkeule entspricht. Die Richtcharakteristik der NF-Schallkeule weist keine Nebenkeulen auf. Damit werden Mehrdeutigkeiten vermieden und die Volumenreverberation bei verschmutzter Wassersäule ist gegenüber linearer Schallerzeugung stark reduziert. Durch die hohe Systembandbreite parametrischer Sedimentecholote können sehr kurze niederfrequente Signale ohne störenden Nachhall abgestrahlt werden.

Durch die oben genannten Eigenschaften und den großen Dynamikbereich bei der Signalanalyse ergeben sich hohe Genauigkeiten bei der Bestimmung der Wassertiefe auch bei den niedrigen Sekundärfrequenzen. Hier besteht ein wesentlicher Unterschied zu den Ergebnissen linear-akustischer Systeme, z. B. bei der Bestimmung von Schlammmächtigkeiten mit Zweifrequenzecholoten. Durch die unterschiedlichen Signalbandbreiten und Richtcharakteristiken bei den beiden Frequenzen sowie der geringeren Systemdynamik unterscheiden sich hier die Wassertiefen beider Frequenzen, abhängig von den Eigenschaften des Bodens an der Oberfläche. Bei höherer Reflektivität des Bodens, wie z. B. bei Sand, sind die Unterschiede geringer als bei Weichsedimenten, z. B. Schlack.

Bei den parametrischen Echoloten SES-2000 sind die Bandbreiten der Sendesignale für alle Frequenzen nahezu gleich groß. Ebenso unterscheiden sich die Richtcharakteristiken im Sendefall kaum. Man erhält das Echo der Bodenoberkante bei allen Frequenzen in derselben Tiefe, unabhängig vom Sediment an der Bodenoberfläche. Abhängig von den Material- und Struktureigenschaften ändert sich jedoch die Amplitude des Bodenechos. Durch die kleinere beschallte Bodenfläche (Footprint, siehe Tabelle 1) und die hohe Systemdynamik ist die Flankensteilheit der niederfrequenten Echosignale wesentlich höher als bei linear-akustischen Systemen. Damit werden Schichtgrenzen mit besserem Kontrast und besserer Schärfe dargestellt. Der Zeitpunkt der Überschreitung des gewählten Schwellwertes ist dadurch mit größter Sicherheit bestimmbar.

Akustisch detektierte Grenzschichten können in der Regel nicht direkt als nautische Tiefe angesehen werden (LIEBETRUTH & EIBFELDT 2011). Revierspezifisch besteht jedoch meist eine Korrelation zwischen den akustisch ermittelten Tiefenwerten und der Tiefenlage der durch sedimentphysikalische Parameter definierten nautischen Sohle.

5 Ergebnisse

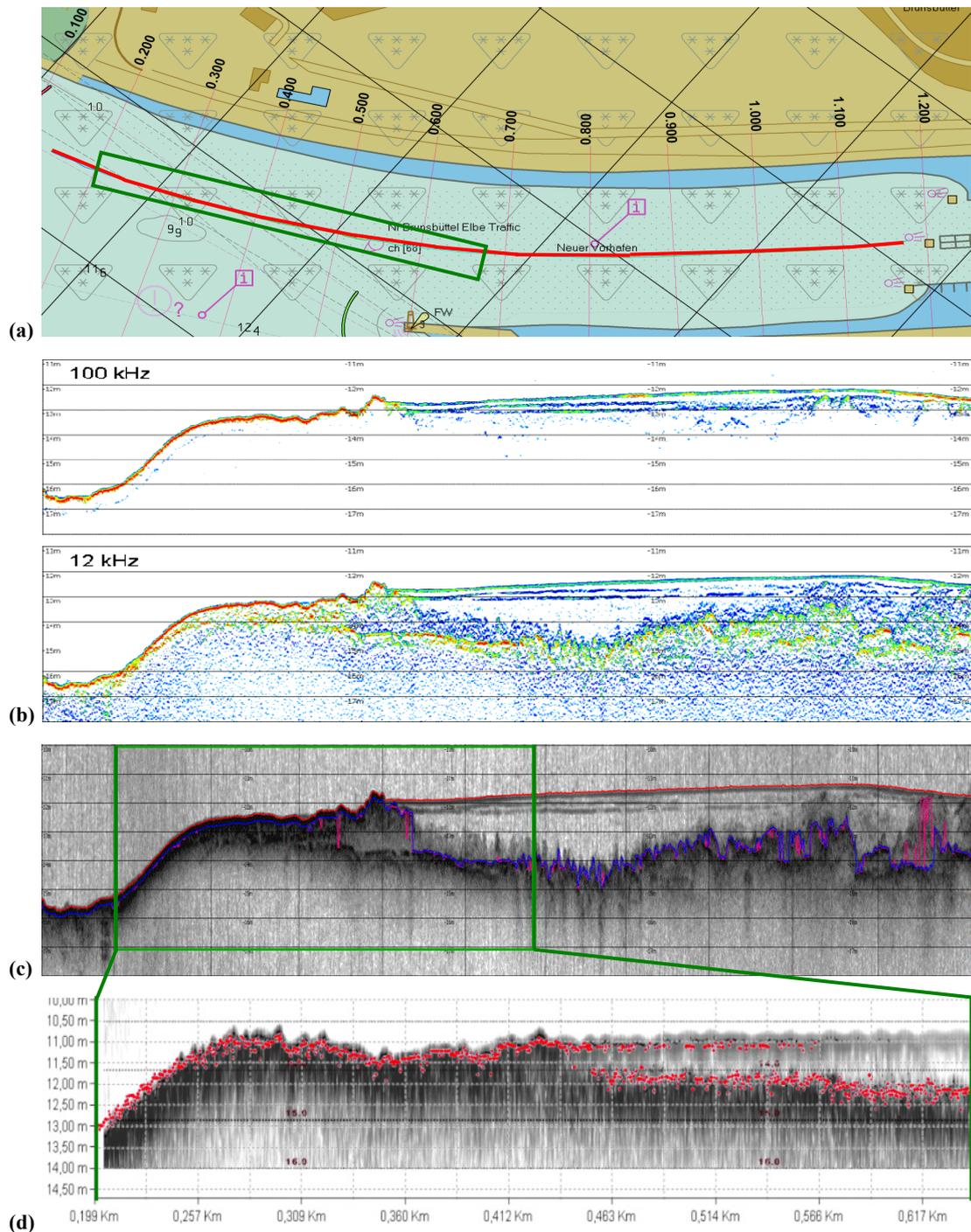


Abb. 3: Testprofil im Neuen Vorhafen Brunsbüttel am 08.08.2012. Deutlich sind die Barre und die dahinter liegende Schwimmschicht zu erkennen.
(a) Lage der Profile (rot: SES-2000; grün: Ausschnitt EA-MCU), (b) Echogramme des SES-2000 SBP: Primärfrequenz (100 kHz); Sekundärfrequenz (12 kHz); beide Echogramme zeigen eine Schichtung der Schwimmschicht, (c) LF-Echogramm SES-2000 mit Wassertiefe/Sohltiefe beider Kanäle, (rot: 100 kHz; magenta: 12 kHz automatisch; blau: 12 kHz manuell bereinigt), (d) Vergleichsdaten WSA-Messsystems (EA-MCU, 15 kHz, Daten vom 03.04.2012) mit automatisch detektierter Sohle

Bei den Daten des parametrischen Sedimentecholotes SES-2000 konnte für beide Frequenzen (HF und LF) die erste Grenzschicht (Übergang vom Wasser zur Sedimentsuspension) in hoher Qualität detektiert werden. In den LF-Daten wurde zusätzlich eine zweite Grenzschicht (Übergang zur festen Sohle) zuverlässig digitalisiert. Eine Auswertung der zeitgleich erhobenen Daten des EA-MCU liegt bisher nicht vor. Die hier dargestellten Ergebnisse (Abb. 3, Abb. 4) beschränken sich daher auf die Auswertung der Daten des parametrischen Sedimentecholotes SES-2000. Hilfsweise werden zum Vergleich Daten früherer Vermessungen des EA-MCU dargestellt. Durch den großen Zeitabstand der Datengewinnung und mögliche Positionsabweichungen ist ein direkter Vergleich hier nicht möglich. Trotzdem ist die bessere Datenqualität des parametrischen Sedimentecholotes augenscheinlich.

6 Zusammenfassung

Das parametrische Sedimentecholot SES-2000 konnte leicht in das Messsystem des Vermessungsschiffes integriert werden. Auch in hydroakustisch problematischen Gebieten wurden Daten in hoher Qualität geliefert. Durch die große Systembandbreite und eine stark gebündelte Schallkeule werden Echogramme mit hohem Kontrast gewonnen, die eine automatische Boden- und Schichtverfolgung ermöglichen. Es ist nur wenig manuelle Nacharbeit zur Entfernung von Ausreißern notwendig.

Zur Bestimmung der nautischen Tiefe muss eine Zuordnung der mit dem Echolot ermittelten akustischen Horizonte zu geophysikalischen Parametern erfolgen. Ein direkter Zusammenhang zwischen den akustisch ermittelten Horizonten und der nautischen Sohle besteht in der Regel nicht, Reflexionen treten nur bei sprunghafter Änderung der akustischen Impedanz auf. Geophysikalische Parameter zur Festlegung der nautischen Sohle (Scherfestigkeit, Viskosität, Dichte, ...) können nur punktuell bestimmt werden. Für diese sollen in einer zweiten Projektphase revierspezifische Korrelationen zu den akustischen Messdaten gefunden werden.

Literatur

- LIEBETRUTH, F.; F. P. EIBFELDT (2011): Nautische Sohle im Schlick – Projekt Nr. 8137. Bundesanstalt für Wasserbau, Abschlussbericht FuE Nr. A39510110128. 22 S.
- LURTON, X. (2002): An Introduction to Underwater Acoustics. Principles and Applications. Springer, London.
- NOVIKOV, B. K.; O. V. RUDENKO, V. R. TIMOSHENKO (1987): Nonlinear Underwater Acoustics. AIP, New York.

Kontakt:

Dr.-Ing. Jens Wunderlich

INNOMAR Technologie GmbH

Schutower Ringstr. 4

18069 Rostock

Tel.: 0381/ 44079-0

Fax: 0381/ 44079 299

E-Mail: jwunderlich@innomar.com

Internet: www.innomar.com