



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



JACOBS
UNIVERSITY

Bilaterale Forschungszusammenarbeit für die zivile Sicherheit
zwischen Deutschland und Indien

Abschlussbericht zum BMBF- Verbundforschungsprojekt

Verletzlichkeit von Transportinfrastrukturen, sowie Warnung und
Evakuierung im Falle von großräumigen Hochwasserereignissen im Inland
Akronym: FloodEvac

Teilvorhaben 4:
Unterwasser Roboter (UUV)

Projekt Förderkennzeichen:
13N13197

Laufzeit des Vorhabens:
01/2015 – 12/2018

Auftragnehmer:
Jacobs University Bremen gGmbH
Robotics Group
Department of Computer Science and Electrical Engineering

Bearbeiter:
Andreas Birk, Christian Atanas Müller, Heiko Bülow, Arturo Gomez Chavez

Impressum

Auftraggeber:	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn
Betreuer des Projektes:	VDI Dr. Jan Bornemeier VDI-Platz 1 40468 Düsseldorf bornemeier@vdi.de
Projektpartner:	<p>1. Teilvorhaben: Koordination und Administration Das Verbundvorhaben FloodEvac wird durch die Universität der Bundeswehr München (UniBwM) koordiniert und administriert.</p> <p>2. Teilvorhaben: Technische Universität München (TUM) Hochwassermodellierung und Überschwemmungsflächen (HWMod) Leitung: Prof. Dr.-Ing. M. Disse, Dr. J. Leandro Bearbeiter: P. Bohla, I. Konnerth, K. Amin</p> <p>3. Teilvorhaben: Universität der Bundeswehr München (UniBwM) Bewertung kritischer Transportinfrastrukturen (TransInfra) Leitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. N. Gebbeken Bearbeiter: Dr.-Ing. I. Videkhina, E. Pfeiffer, M. Garsch</p> <p>4. Teilvorhaben: Jacobs University Bremen (JUniB) Unterwasser Roboter (UUV) Leitung: Prof. Dr. A. Birk Bearbeiter: T. Dörnbach, Chr. Müller</p> <p>5. Teilvorhaben: Hochschule Mittweida (HSMW) Smartphone-basierte Sensorfusion (SmabaSenf) Leitung: Prof. Dr. rer. nat. habil. Th. Haenselmann Bearbeiter: M. Benndorf</p> <p>6. Teilvorhaben: Technische Universität Kaiserslautern (TUK) Robuste Evakuierung und Zivile Sicherheitsplanung (RobEZIS) Leitung: Univ.- Prof. Dr. rer. nat. H. W. Hamacher Bearbeiter: A. Kinscherff, S. Schmitt, C. Heßler</p> <p>7. Teilvorhaben: Freie Universität Berlin (FUB)/ Katastrophenforschungsstelle (KFS) Katastrophenkulturen in Deutschland und Indien im Klimawandel“ (Katastrophenkultur) Leitung: Prof. Dr. Martin Voss Bearbeiter: S. Merkes, L. Bledau, H. Upadhyay</p>
Verbundkoordinator:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Gebbeken Universität der Bundeswehr München Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften Institut für Mechanik und Statik / Labor für Ingenieurinformatik Forschungszentrum RISK Werner-Heisenberg-Weg 39, Geb. 33/400 D-85577 Neubiberg Tel.: +49-89-6004-3414, Fax: +49-89-6004-4549 norbert.gebbeken@unibw.de

Inhaltsverzeichnis

1	Kurze Darstellung	4
1.1	Aufgabenstellung	4
1.2	Voraussetzungen	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	8
2	Eingehende Darstellung	9
2.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses	9
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	9
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	20
2.4	Nutzen und insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse	20
2.5	Projektrelevante Fortschritte bei anderen Stellen innerhalb des Förderzeitraums	21
2.6	Veröffentlichungen des Ergebnisses	21
3	Erfolgskontrollbericht (in der nicht öffentlichen Fassung)	23
4	Kurzfassung – Berichtsblatt	28
5	Document Control Sheet	29
6	Literatur	30
7	Abkürzungsverzeichnis	31
8	Abbildungsverzeichnis	31
9	Tabellenverzeichnis	32

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Brücken sind kritische Transportinfrastrukturen bei Fluten. Sie sind sehr wichtig für die Katastrophenlogistik und Evakuierungen; gleichzeitig werden sie aber von der Flut oft erheblich in Mitleidenschaft gezogen. Der Stand der Technik zur Beurteilung möglicher Schäden beruht auf Inspektionen oberhalb der Wasserlinie – was eine hohe Unsicherheit zur Folge hat – oder in der Verwendung von Tauchern – was sehr hohe Risiken für die Taucher beinhaltet und nur zu informellen Berichten über die Situation unter Wasser genutzt werden kann. Dieses Teilvorhaben beschäftigte sich daher mit der Nutzung eines neuartigen Konzepts eines Marineroboters zur effizienten und sicheren Inspektion von Strukturen wie Kaianlagen und Brücken im Kontext von Flutkatastrophen.

1.2 Voraussetzungen

Das Ziel des Teilprojekts „Unterwasserinspektion durch einen Marineroboter“ war die wissenschaftliche Erforschung der Möglichkeiten eines neuartigen Gesamtsystems aus einem Unmanned Underwater Vehicle (UUV) mit bildgebenden Sonar und eines darauf aufbauenden Softwarepakets zur effizienten und sicheren Inspektion von kritischen Infrastrukturen im Kontext von Flutkatastrophen.

Das zentrale wissenschaftlich/technische Ziel des Teilvorhabens ist ein neuartiger Marineroboter zur Unterwasserinspektion von relevanten Strukturen wie z.B. Brücken. Dieses Ziel beinhaltet die mechanische und elektronische Integration verschiedener Hardwarekomponenten – insbesondere eines kommerziellen Antriebssystems, eines bildgebenden Sonars, eines Versorgungs- und Kommunikationskabelsystems sowie einer Bedieneinheit aus Interfacebox und gehärtetem Laptop. Diese Hardwareplattform wurde durch Softwarearbeiten ergänzt, die den Betrieb und die Erzeugung von relevanten Missionsergebnissen gewährleisten. Dazu gehörten Softwarearbeiten, die die Datenübertragungen vom Unterwasserroboter zur Bedienerstation und umgekehrt vom Bediener zum Roboter gewährleisten. Weiterhin wurde Software zur Aufarbeitung der Sonardaten durch Verfahren zur Signalverbesserung entwickelt. Darauf aufbauend wurden sowohl intelligente autonome Teilfunktionen zur Bedienerassistenz als auch Methoden zur räumlichen Informationsintegration, d.h. zur Erstellung von lokalen Karten der Missionsumgebung, entwickelt. Letztlich wurde ein Grafisches Userinterface (GUI) zur Verfügung gestellt mit dem Endnutzer das Gesamtsystem bedienen können. Das GUI stellt dabei auch Möglichkeiten bereit, mit den gewonnenen Daten sowohl bereits während der Mission wie auch nach deren Abschluss zu interagieren.

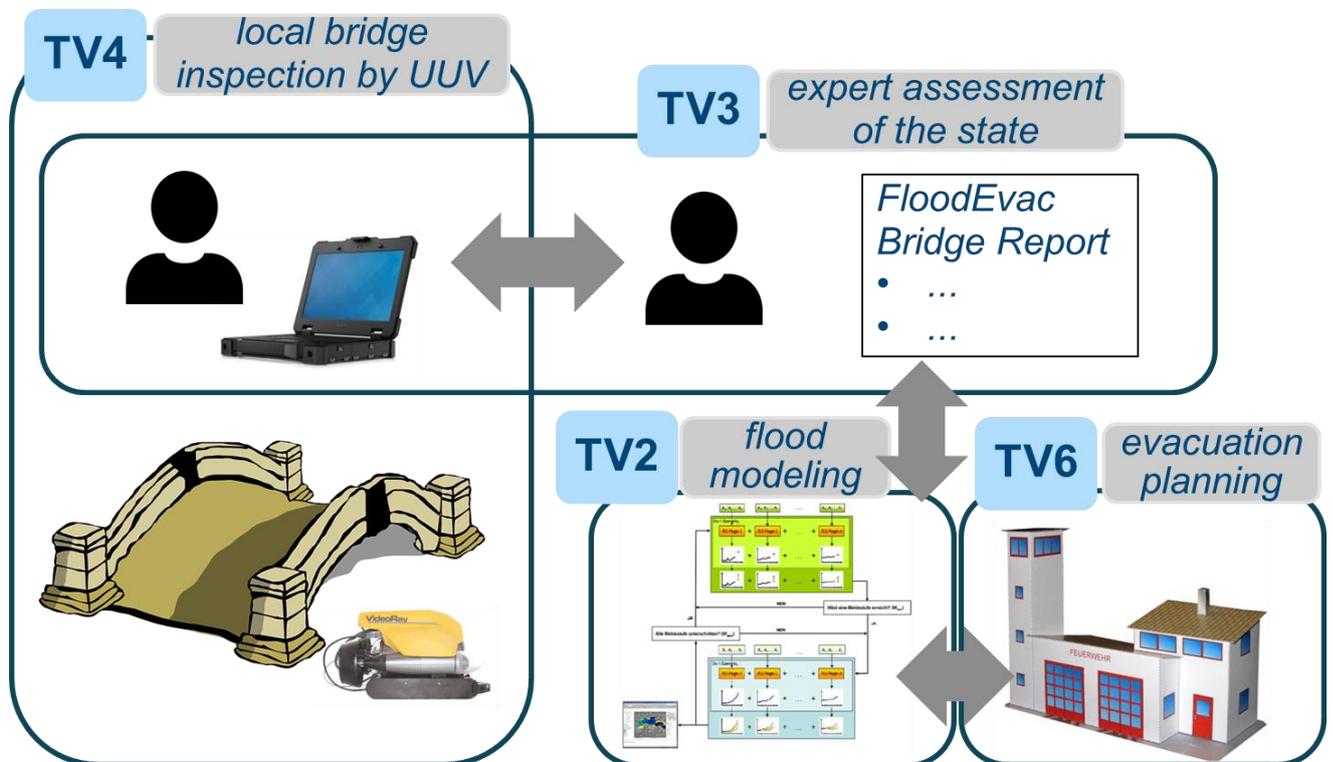


Abbildung 1: Verzahnung des Teilvorhabens „TV4 Unterwasser Roboter (UUV)“ mit dem Teilvorhaben „TV3 Bewertung kritischer Transportinfrastrukturen (TransInfra)“ und die darüber erfolgende Verlinkung mit den Teilvorhaben „TV2 Hochwassermodellierung und Überschwemmungsflächen (HWMoD)“ und „TV6 Robuste Evakuierung und Zivile Sicherheitsplanung (RobEZis)“.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

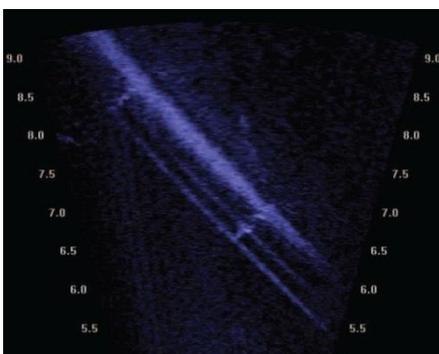


Abbildung 2: Links: Abgebrochens Teil einer Kaianlage mit Geländer das sich am Fuß der Marco Island Brücke nach Hurrikan Wilma verkeilt hat (aus [SML09]). Rechts: Treibgut in der Nähe eines gefluteten Hauses nach dem Tohoku Tsunami (aus [MDN11]).

Durch eine Flut verursachte Unterspülungen, Brüche oder große verkeilte Stücke von Treibgut (Abbildung 2, links) lassen sich oft nur unterhalb der Wasseroberfläche erkennen – Inspektionen oberhalb der Wasserlinie liefern daher nur grobe Indikationen für den Zustand einer Brücke oder Kaianlage. Taucher können für eine echte vor Ort Analyse der Situation genutzt werden. Doch schlechte Sicht, beschädigte und instabile Strukturen sowie Treibgut (Abbildung 2, rechts) führen zu erheblichen Risiken für den Einsatz von Tauchern. Weiterhin führen die typischerweise extrem schlechten Sichtbedingungen bei Fluten dazu, dass die Taucher die Strukturen von Hand abtasten müssen, um Unterspülungen oder Verkeilungen überhaupt erkennen zu können. Dieses Verfahren ist nicht nur extrem risikoreich für die Taucher, es hat auch eine hohe Fehlerquote in der Erkennung von kritischen Schäden.

Der Einsatz eines Marineroboters ist eine Alternative zu extrem riskanten und bedingt informativen Einsätzen von Tauchern und eine sinnvolle Ergänzung zu reinen Inspektionen oberhalb der Wasserlinie, die nicht die gesamte Situation erfassen können.

Generell besteht ein wachsendes Interesse am Einsatz von Marinerobotern in Schutz- und Rettungsanwendungen. Beispiele sind der Schutz von Häfen [RWH10][RoBa09][KeHo06], Aufklärung [BPM05][MEJ03], Infrastruktur-Monitoring zum Schutz vor Unfällen [DeV00] und insbesondere auch Inspektion von kritischer Infrastruktur im Kontext von Naturkatastrophen: Beispiele sind Brückeninspektionen durch Marineroboter bei den Hurrikanen Wilma (2005, Florida) und Ike (2008, Texas) [SML09][MSL09] sowie Inspektionen von Hafenstrukturen im Kontext des Tohoku Erdbebens und Tsunami (2011, Japan) [MDN11]. Obwohl Marineroboter eindeutige Vorteile für diese Aufgaben haben [SML09][MSL09][MDN11], war und ist dieses Anwendungsgebiet noch in einem frühen Forschungsstadium. Die bisherigen Anwendungen sind von sehr einfachen ferngesteuerten Systemen in Form von Remotely Operated Vehicles (ROV) geprägt die nur einfachste Steuerungsmöglichkeiten haben, die einen Einsatz in komplexen Umgebungen erschweren. Zudem fehlen Möglichkeiten zur problemspezifischen Aufarbeitung der durch den Marineroboter erfassten Daten.

Relevante Veröffentlichungen

[SML09] E. Steimle, R. Murphy, M. Lindemuth, and M. Hall, "Unmanned marine vehicle use at hurricanes wilma and ike," in OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges, 2009, pp. 1–6.

[MDN11] R. R. Murphy, K. L. Dreger, S. Newsome, J. Rodocker, E. Steimle, T. Kimura, K. Makabe, F. Matsuno, S. Tadokoro, and K. Kon, "Use of remotely operated marine vehicles at minamisanriku and rikuzentakata japan for disaster recovery," in Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2011 IEEE International Symposium on, 2011, pp. 19–25.

[RWH10] S. Reed, J. Wood, and C. Haworth, "The detection and disposal of ied devices within harbor regions using auvs, smart rovs and data processing/fusion technology," in Waterside Security Conference (WSS), 2010 International, 2010, pp. 1–7.

- [RoBa09]** A. Rodningsby and Y. Bar-Shalom, "Tracking of divers using a probabilistic data association filter with a bubble model," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, vol. 45, no. 3, pp. 1181–1193, 2009.
- [KeHo06]** R. T. Kessel and R. D. Hollett, "Underwater intruder detection sonar for harbour protection: State of the art review and implications," in *Second IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security and Safety*, 2006.
- [BPM05]** N. Le Bouffant, P. Pidsley, J.-P. Malkasse, and F. Florin, "Automatic mcm mission control for auv systems," in *Oceans 2005 - Europe*, vol. 2, 2005, pp. 930–936 Vol. 2.
- [MEJ03]** J. Morrison, B. Evans, T. James, and K. Allen, "Gambit mcm auv: overview and system performance," in *OCEANS 2003. Proceedings*, vol. 3, 2003, pp. 1723–1729 Vol.3.
- [DeV00]** J. DeVault, "Robotic system for underwater inspection of bridge piers," *Instrumentation and Measurement Magazine, IEEE*, vol. 3, no. 3, pp. 32–37, 2000.
- [MSL09]** R. Murphy, E. Steimle, M. Hall, M. Lindemuth, D. Trejo, S. Hurlebaus, Z. Medina-Cetina, and D. Slocum, "Robot-assisted bridge inspection after hurricane ike," in *Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR)*, 2009 IEEE International Workshop on, 2009, pp. 1–5.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während des Projekts fand eine intensive Zusammenarbeit und Austausch mit den deutschen und indischen Partner statt. Dies beinhaltete u.a. folgende Treffen:

- Kick-off Meeting in München, 27.02.2015
- Projekttreffen in Berlin, 12.6. 2015
- Workshop in Bremen, 25.-26.11. 2015
- Projekttreffen in München, 24.05.2016
- Projekttreffen und Feldtests in Kulmbach, 05.07. – 06.07.2016
- Meilensteintreffen in Kulmbach, 31.08. – 02.09.2016
- Projekttreffen, New Delhi, Indien, 26.02.-01.03.2017
- Projekttreffen, Pfalzakademie, Lambrecht, 09.10.-10.10.2017
- Projekttreffen, München, 17.11.2017
- Projekttreffen, Mittweida, 11.-12.10.2018
- Projekttreffen, New Delhi, Indien, 02.12.-03.12.2018

Während der Treffen und über Email wurde mit den anderen Verbundpartnern eine Vielzahl von Absprachen getroffen und Kooperationen verabredet, u.a. bzgl.

- Zielsetzung des Demonstrators (online – offline)
- Ziele und Abläufe beim Systemeinsatz und der Datenerfassung
 - Priorisierung der Robotereinsätze durch Abschätzung der Gefährdung spezifischer Brücken durch Flutmodellierung (TV2, TUM)
 - Bedienung des Inspektionsroboters durch Operator (TV4, Jacobs)
 - vor Ort Expertenbewertung und Einsatzleitung (TV3, UniBwM)
 - zeitnahe Weitergabe und Einbindung der Ergebnisse zur übergeordneten Bewertung und Planung (TV6, UniKL)
- Weitergabe der Daten und Karten an andere Teilprojekte:
- Priorisierte Liste zu inspizierender Brücken: Erstellung über Flutmodellierung von TUM (TV2); Weiterleitung an Jacobs (TV4) und UniBwM (TV3)
- FloodEvac Brücken-Zustandsbericht: Erstellung vor Ort in Kooperation Jacobs (TV4) und UniBwM (TV3); Weiterleitung an UniKL (TV6)

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

Hardwarekomponenten und Integration

Das zentrale wissenschaftlich/technische Ziel des Teilvorhabens war ein neuartiger Marineroboter zur Unterwasserinspektion von relevanten Strukturen wie insbesondere Brücken – im Folgenden kurz als Inspektionsroboter bezeichnet. Dafür waren verschiedene Hardware (HW) und Software (SW) Arbeiten notwendig. Es erforderte als Grundlage die mechanische und elektronische Integration verschiedener Hardwarekomponenten – insbesondere eines kommerziellen Antriebssystems in Form eines Unmanned Underwater Vehicles (UUV) als mobile Plattform, eines bildgebenden Sonars, eines Versorgungs- und Kommunikationskabelsystems sowie einer Bedieneinheit aus Interfacebox und gehärtetem Laptop.

Aufgrund von Problemen bei der Offenlegung der Schnittstellen bei dem ursprünglich im Antrag vorgesehenen UUV wurde ein überarbeitetes Konzept für die Hardwarekomponenten notwendig. Dieses überarbeitete Konzept wurde in Rücksprache mit dem Projektträger zur erfolgreichen Beschaffung der notwendigen Komponenten im ersten Projektjahr verwendet.



Abbildung 3: Übersicht der Systemkomponenten

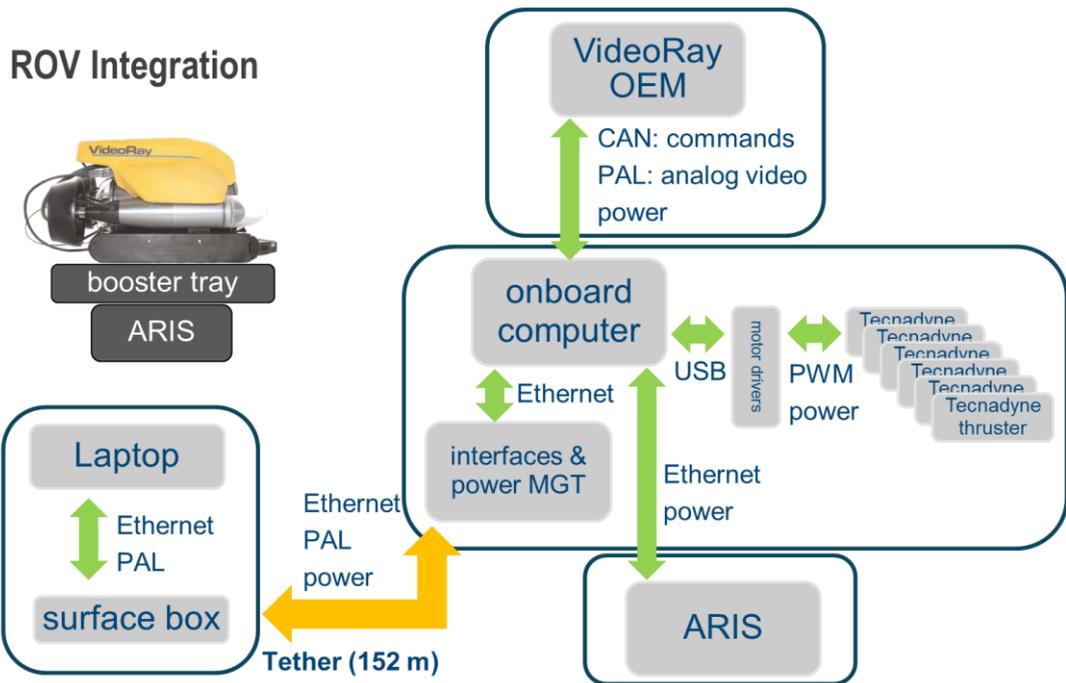


Abbildung 4: Übersicht der Systemarchitektur

Ein wichtiges Element für die Systemintegration des Inspektionsroboters ist eine Interface Box, die elementare elektronische Schnittstellen zwischen dem gehärteten Laptop als Bedienerstation und dem UUV sowie den zugehörigen Sensoren als Payload darstellt. Diese Interface Box wurde erfolgreich im ersten Projektjahr fertiggestellt und getestet.



Abbildung 5: Interface Box zwischen Bediener-Laptop und Vehicle

Zum Erfassen von Daten über längere Mission ohne Tether, d.h. mit längerer Betriebsdauer allerdings ohne die Möglichkeit von direkten Tauchgängen, wurde auch die Verwendung eines Unmanned Surface Vehicles (USV) als Trägerplattform erfolgreich getestet.



Abbildung 6: Das Unmanned Surface Vehicle (USV) "Muddy Waters II" als Trägerplattform.

Integration und Versuche mit bildgebenden Sonar

Ein hochauflösendes bildgebendes Multibeam Sonar oder kurz Imaging Sonar ist eine wichtige Komponente bei der Umsetzung des Teilvorhabens des FloodEvac Inspektionsroboters. Hochauflösende bildgebende Multibeam-Sonare sind eine recht neue technologische Entwicklung für die es nur wenige verschiedene Geräte auf dem Markt gibt. Der entscheidende Parameter für die Geräteauswahl ist die räumliche Auflösung, die für die Inspektion von kritischen Infrastrukturen im Kontext von Flutereignissen möglichst hoch sein muss. Die in dieser Hinsicht besten Geräte werden von den Firmen Blueview und Sound Metric angeboten. Ein Vergleich am Markt verfügbarer Geräte ist in Tabelle 1 aufgeführt.

Firma	Gerät	kHz	Reichweite (m)	Auflösung (cm)	FoV (deg x deg)	Beam breite (deg x deg)	max. Update Rate (Hz)	Gewicht (kg)	Abm. (cm x cm x cm)
Blueview	P450-45	450	175	5	45	1 x 15	12	2.59	24.4 x D17.5
Blueview	P900-45	900	60	2.5	45	1 x 20	15	2.4	28.7 x D12.7
Sound Metric	ARIS-3000	3000	15	0.3	30	0.25x14	15	5.17	26x16x14

Tabelle 1: Vergleich von Optionen für das Imaging Sonar. Kritischer Parameter ist die notwendige räumliche Auflösung die eine Inspektion von Unterwasserstrukturen erlaubt. Diese wird nur einem Gerät auf dem Markt erreicht, nämlich einem ARIS-3000.

Die Geräte der Firma Blueview sind günstiger, doch sie bieten maximal eine (theoretische) Auflösung im Bereich von mehreren Zentimetern – mit Berücksichtigung des Rauschens lassen sich somit Strukturen nur mit einer Auflösung im Dezimeterbereich begutachten. Dies ist für das Erkennen und Begutachten größerer Strukturen ausreichend, z.B. von Schiffwracks als Hindernisse in einer Fahrrinne. Es genügt aber nicht für die im Rahmen dieses Teilvorhabens geplanten Arbeiten zur effizienten und sicheren Inspektion von kritischen Infrastrukturen im Kontext von Flutkatastrophen. Dafür ist das Sound Metrics ARIS-3000 besser geeignet. Sound

Metrics ist bisher die einzige Firma die mit dem ARIS-3000 ein Gerät im MHz-Bereich und somit mit einer hohen Auflösung anbietet. Die Wahl für ein Imaging Sonar fiel somit auf ein Sound Metrics ARIS-3000. Ein ARIS 3000 wurde dementsprechend im ersten Projektjahr beschafft und im August 2015 geliefert.

Versuche mit dem Gerät fanden erfolgreich ab Herbst 2015 statt und durch Arbeiten zum ROS Treiber für die ARIS Anbindung unter Linux, die Noise Reduction und Image Enhancement durch Computer Vision Filter ergänzt. Es wurden in diesem Zusammenhang u.a. folgende Arbeiten durchgeführt:

- HW / SW Treiber für ARIS 3000
- SW zur Visualisierung von ARIS Daten auf dem Bediener-Laptop
- SW zur Datenaufbereitung
- Tests der Parameter des Geräts und Evaluierung seiner Leistungsfähigkeit

Das ARIS 3000 hat eine theoretische maximale Auflösung von 3 mm. Allerdings haben Labortests gezeigt, dass die reale Auflösung selbst mit optimal eingestellten Parametern im Bereich von einigen Zentimetern ist. Damit ist das Gerät nichtdestotrotz für die vorgesehenen Einsatzzwecke durchaus gut geeignet, da die Auflösung zur Detektion von Unterspülungen und von verkeiltem Treibgut sehr gut geeignet ist.

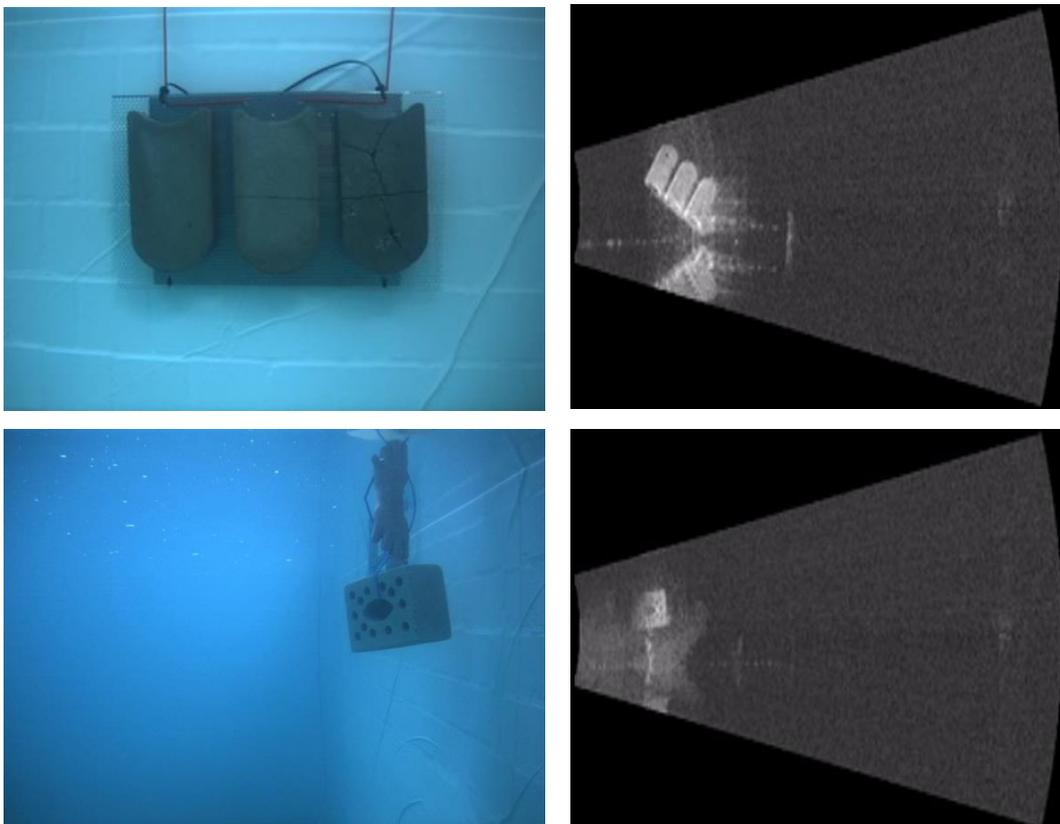


Abbildung 7: Labortests mit dem ARIS 3000 bildgebenden Sonar.

Weiterhin haben Feldversuche gezeigt, dass selbst bei einer Sicht von <20 cm im Wasser keine Auswirkungen auf die Bildqualität des Sonars zu erkennen ist. Dies

bestätigt das sehr gute Potential des bildgebenden Sonars bei sehr schlechten Sichtverhältnissen, die als Standardbedingungen bei deutschen Binnengewässern angesehen werden müssen.

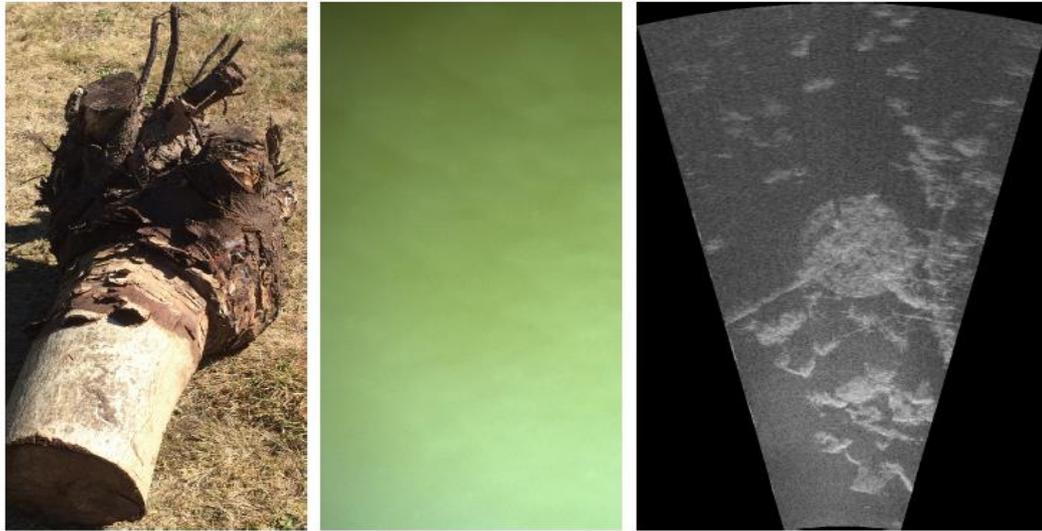


Abbildung 8: Daten des ARIS Sonars unter extremen Sichtbedingungen: ein versenkter Baumstumpf (links) ist im Kamerabild nicht erkennbar (Mitte) während er im Sonarbild erscheint (rechts).

Weiterhin wurde im zweiten Projektjahr zusätzliche Software entwickelt, die zur Verbesserung der Bildqualität des Sonars dient. Dafür wurden u.a. Standardmethoden zur Kontrastverstärkung und Rauschunterdrückung implementiert.

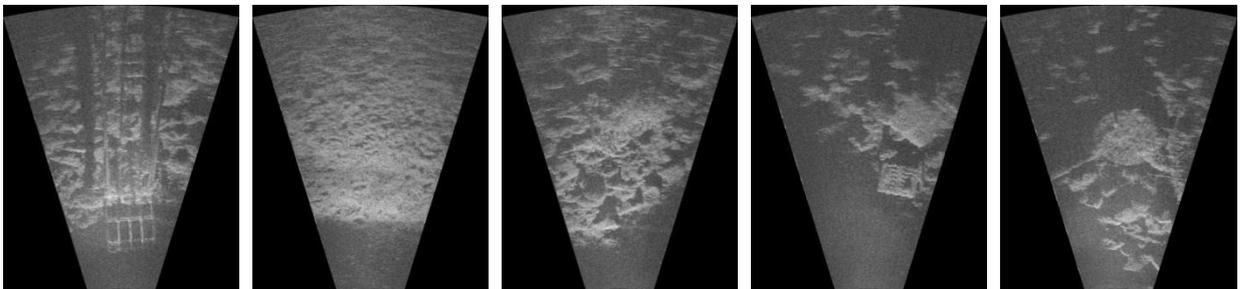


Abbildung 9: Daten des ARIS 3000 von einem Feldtest an einer Brücke.

Roboterkontrolle und Bedienerassistenzfunktionen

Zum grundlegenden Betrieb des Inspektionsroboters waren neben der Integration von Hardwarekomponente auch entsprechende Arbeiten für Softwaretreiber und Integration notwendig, die erfolgreich im ersten Jahr durchgeführt wurden.

Dazu gehörte insbesondere die Entwicklung von Software zur Unterstützung der grundlegenden Funktionen zur Roboterkontrolle und Bedienerassistenzfunktionen sowie der Bewegungssteuerung durch Vektorkommandos unter dem Robot Operating System (ROS) auf Ubuntu Linux:

- Roboterkontrolle und Bedienerassistentenfunktionen
 - Softwaretreiber zur Motorensteuerung vom Laptop
 - Robot Operating System (ROS) auf Ubuntu Linux
 - RS485 über USB Anbindung für Steuersequenzen und Telemetrie Rückkanal
 - ROS Anbindung von CAN Commands
- Software zur Bewegungssteuerung durch Vektorkommandos
 - ROS Anbindung von Steuersequenzen
 - ROS Anbindung von Controlpad

Insgesamt ist eine grundlegende Steuerung der Roboterplattform unter ROS/Linux über den Bedienerlaptop implementiert worden.

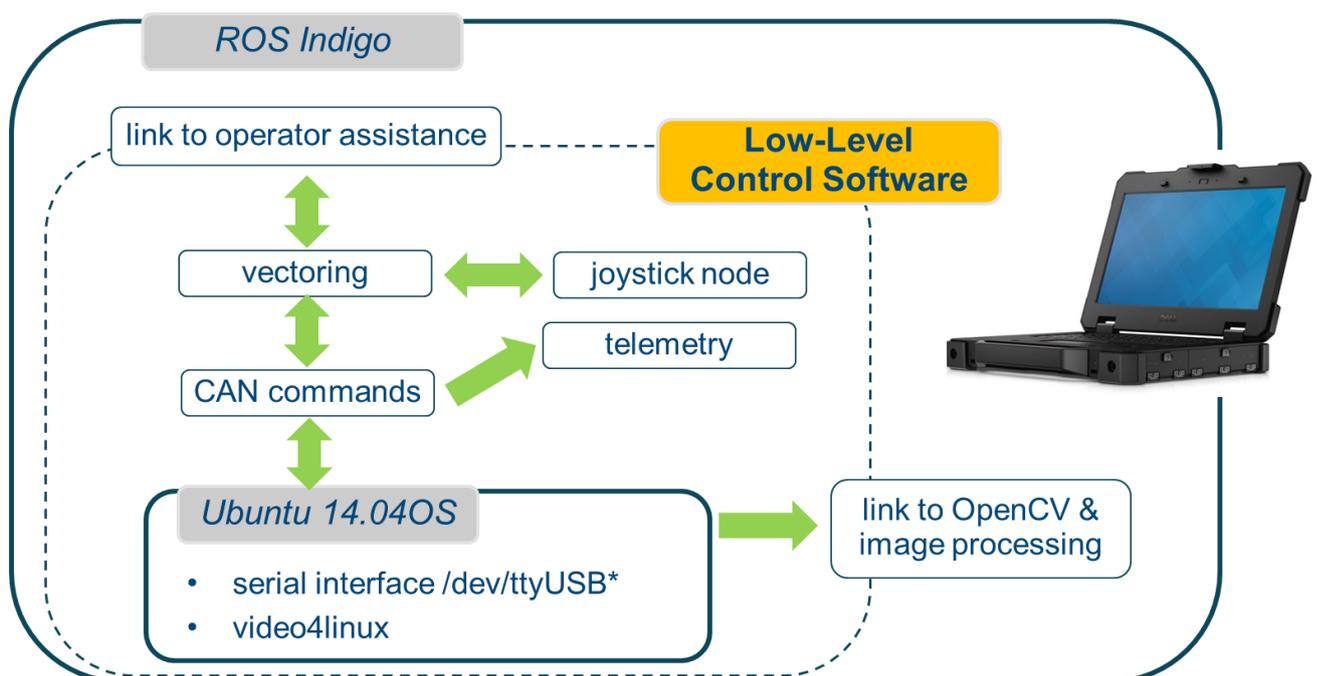


Abbildung 10: Softwaretreiber für Roboterkontrolle und Bedienerassistentenfunktionen

Die Arbeiten zur Roboterkontrolle und zu Bedienerassistentenfunktionen konzentrierten sich wie geplant zuerst einmal auf grundlegende Funktionen, um Labor- und Feldtests zu ermöglichen.

Darauf aufbauend erfolgten im zweiten Projektjahr Arbeiten zur komfortableren Steuerung durch z.B. Endnutzer:

- Anpassung von low-level Motion Control SW
- SW für User Interface zur Robotersteuerung via Laptop (Joystick)

Weiterhin wurden Arbeiten zum visual Servoing mittels der Sonardaten durchgeführt. Insbesondere wurden über lokale improved Fourier Mellin Invariant (iFMI) Registrierung Bewegungsvektoren geschätzt, die es erlauben, die Komponenten der Eigenbewegung des Roboters zu schätzen. Auf dieser Basis ist eine Bewegungskompensation möglich, die der Implementierung der Bedienerassistentenfunktionen wie insbesondere dem Station Keeping dienen.

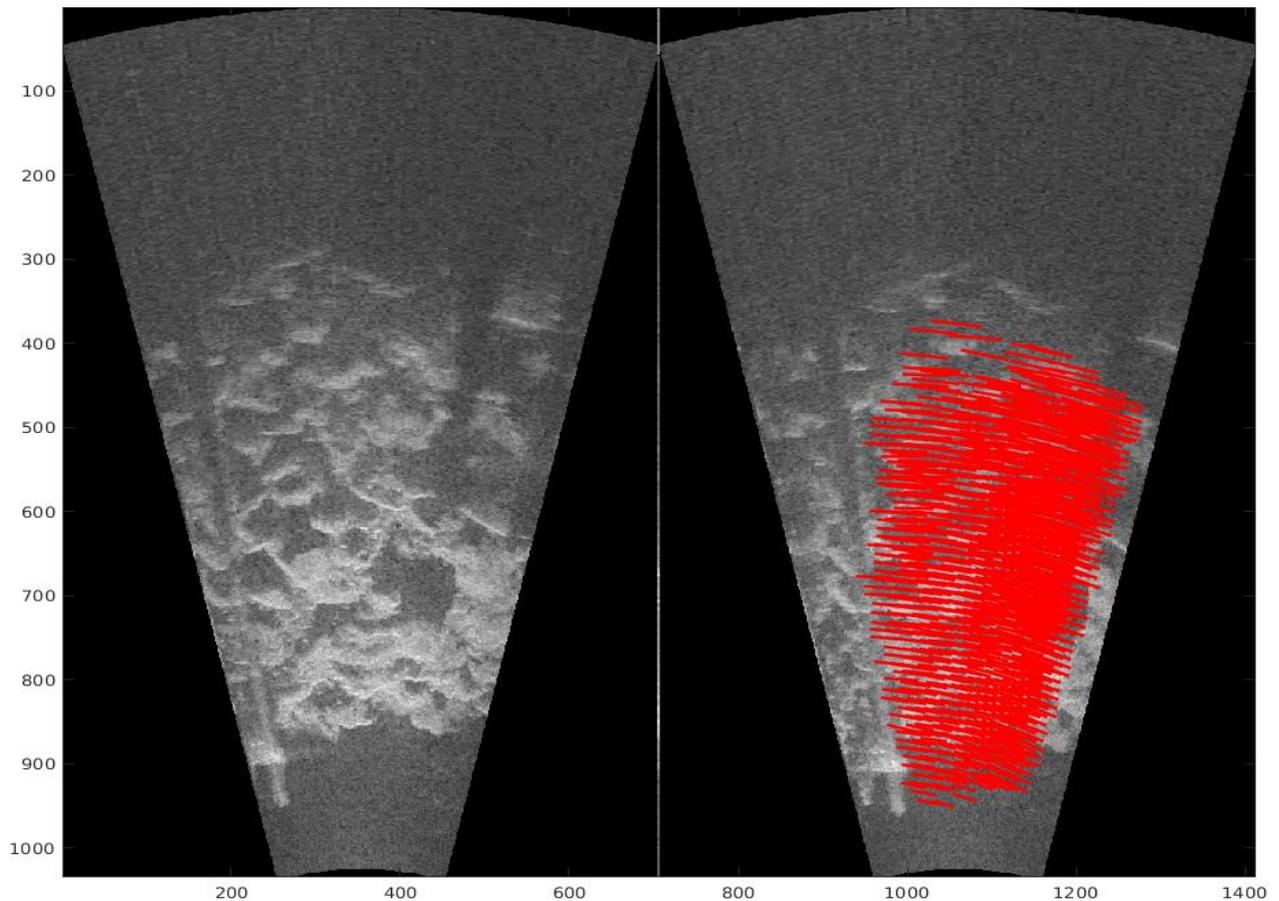


Abbildung 11: Motion Estimation Vektoren (in Rot) die die über Registrierung geschätzte Eigenbewegung des Roboters anzeigen.

Räumliche Informationsintegration von Sonardatenzeitreihen für Erstellung von Lokalen Karten

Die Aufarbeitung der an verschiedenen Stellen aufgenommenen Sonarbilder zu konsistenten räumlichen Repräsentationen ist aus zwei unterschiedlichen Gründen von großem Interesse, nämlich 1) als Basis für intelligente autonome Fahrerassistenzfunktionen und 2) als wichtige Missionsergebnisse, die eine erheblich bessere Zustandsbestimmung erlauben als einzelne Sonarbilder. Dies erfordert die Verwendung von Registrierungsmethoden, d.h. die maschinelle Detektierung und räumliche Inbezugsetzung ähnlicher Regionen in den aufbereiteten Sensordaten.

Dafür konnte eine spezielle spektrale Registrierungsmethode in Form von der improved Fourier Mellin Invariant (iFMI) erfolgreich an Imaging Sonar Daten angepasst werden. Auf dieser Basis konnten in Feldversuchen Karten rein durch Registrierung erzeugt werden.

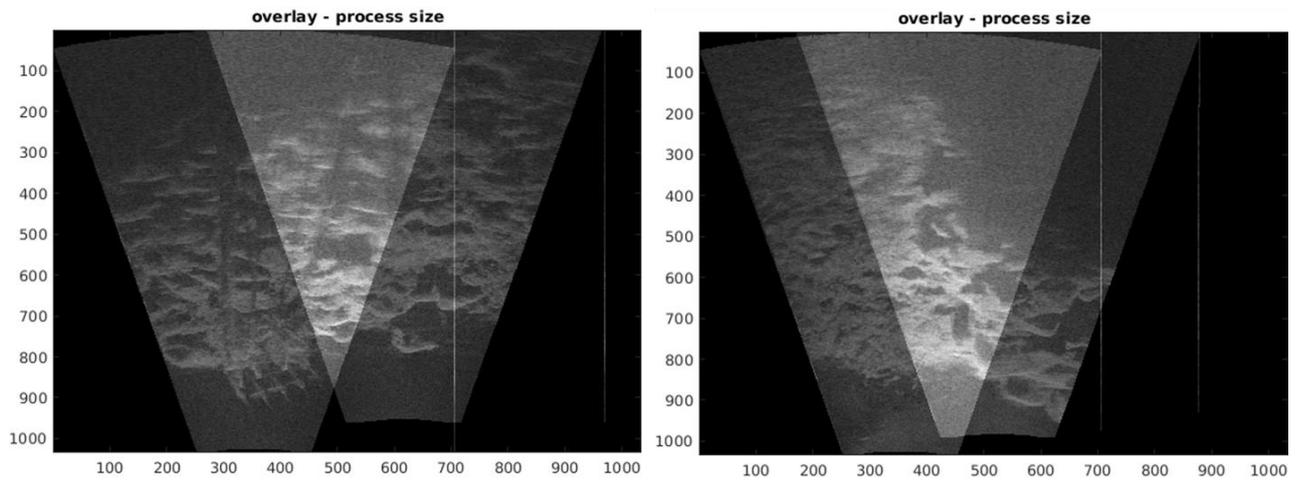


Abbildung 12: Zwei Beispiele für iFMI Registrierung von Sonardaten

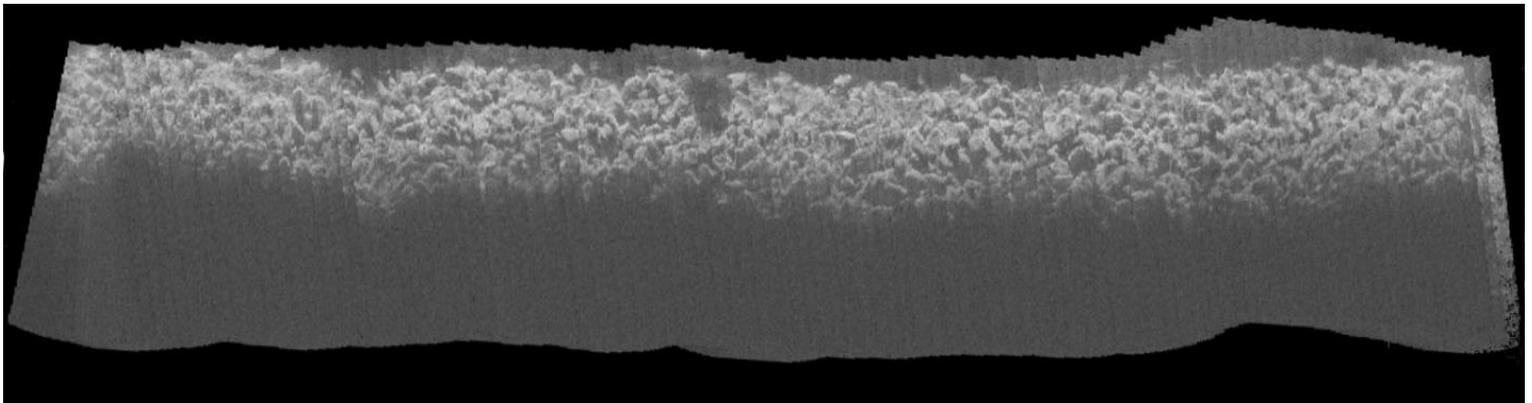


Abbildung 13: Karte die durch iFMI Registrierung aus einer Sequenz von Sonardaten berechnet wurde

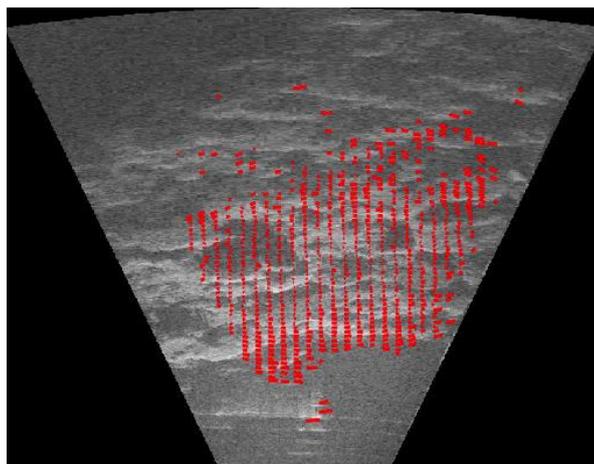


Abbildung 14: Erkennen von 3D Strukturen in 2D Sonarbildern durch iFMI Registrierung

Weiterhin konnten Ergebnisse zum maschinellen Erkennen von 3D Strukturen in 2D Sonarbildern erzielt werden. Dafür wurde iFMI Registrierung auf Subwindows der Sonardaten angewendet.

Zum Evaluieren der Ergebnisse wurden mehrfach Feldtests des Demonstratorsystems durchgeführt, u.a. an der Karl Carstens Brücke in Bremen. Neben der allgemeinen Funktionstüchtigkeit des Systems und seiner einzelnen Komponenten, wurde insbesondere gezeigt, dass bei geringer, bzw. de facto nicht vorhandener Sicht (<20 cm) verwertbare Aufnahmen mit dem bildgebenden Sonar gemacht und Karten erstellt werden konnten, auf den mögliche Unterspülungen oder Verklausungen erkennbar wären.



Abbildung 16: Karl Carstens Brücke in Bremen.



Abbildung 15: Feldversuche an der Karl Carstens Brücke.

Ausbringung von Smartphones als Vibrationssensoren

Über den ursprünglichen Arbeitsplan hinaus wurden Synergieeffekte genutzt und Versuche mit einem bereits vorhandenem mobilen Roboter mit Greifarm unternommen, um in Kooperation mit der Universität der Bundeswehr München (TV3) und der Hochschule Mittweida (TV5) Versuche mit Smartphones als kostengünstige Vibrationssensoren durchzuführen.

Der mobile Roboter mit Greifarm ist im Rahmen verschiedener früherer Projekte der Jacobs University entwickelt worden. Er ist unter anderem mit einer reichhaltigen Sensorausstattung und Softwarefunktionen versehen, die einen intelligenten autonomen Betrieb ermöglichen.

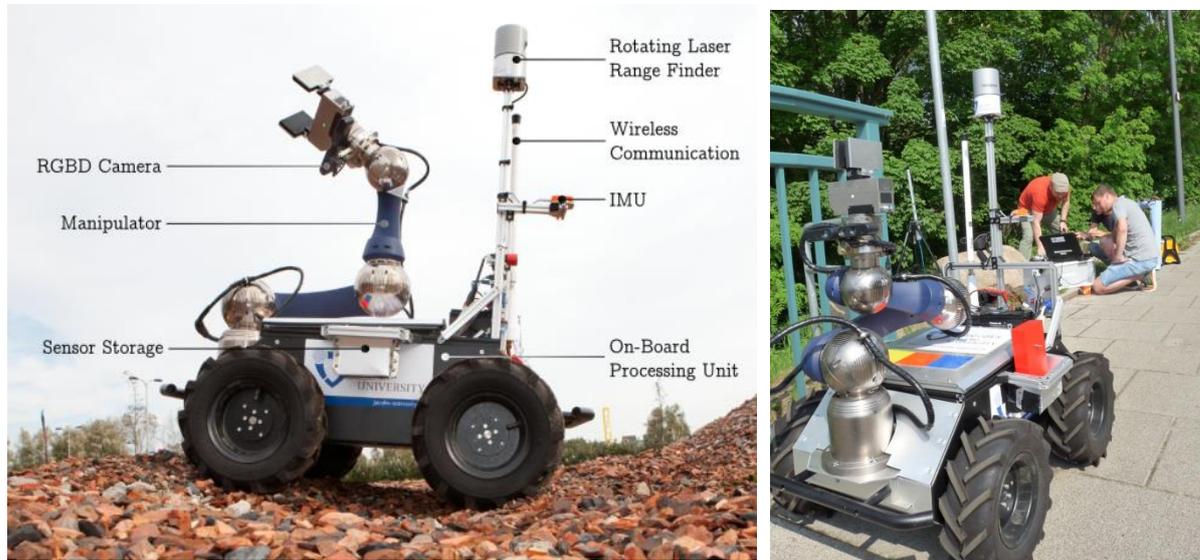


Abbildung 17: Mobiler Roboter mit Greifarm der Jacobs University.

Dadurch war es mit überschaubarem Aufwand möglich innerhalb des FloodEvac Projekts Versuche durchzuführen, die über die ursprünglich geplanten Aufgaben hinaus gingen und die als erstes Proof-of-Concept für weitere Arbeiten in diese Richtung dienen können.

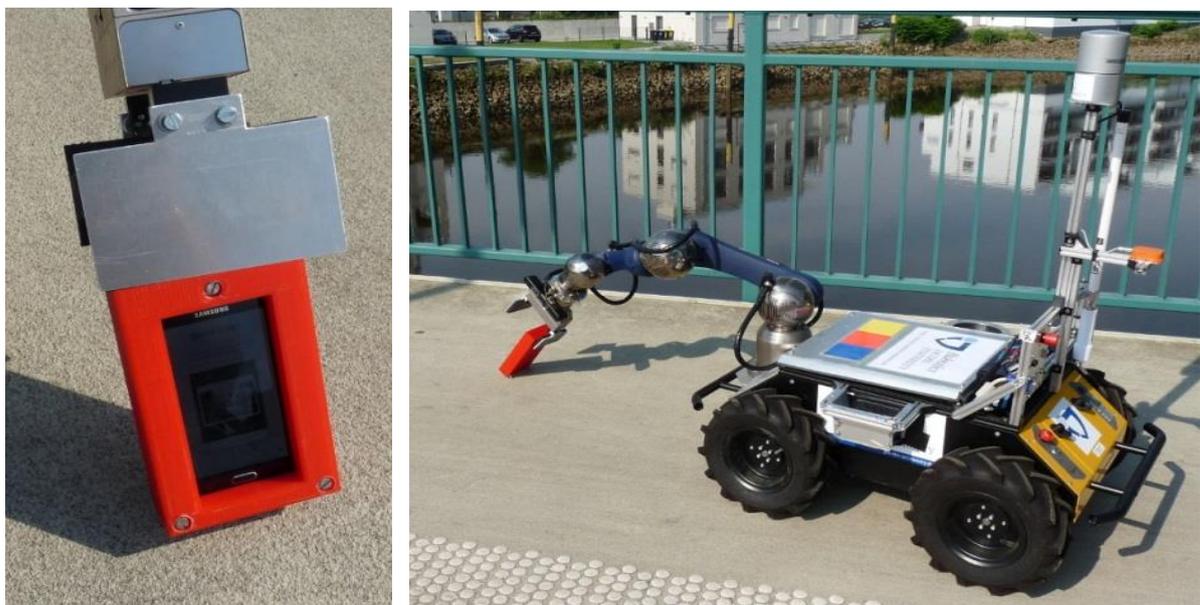


Abbildung 18: Eine durch 3D-Druck erzeugte Hülle (links) erlaubt das autonome Ausbringen von Smartphones durch den Roboterarm (rechts).

Dafür wurden über 3D-Druck Hüllen erzeugt, die ein effektives Entwickeln von Software zum autonomen Greifen und Ausbringen von Smartphones als kostengünstige

Vibrationssensoren erlaubten. Durch die Verwendung eines mobilen Roboters für die Ausbringung können nicht nur Risiken für Menschen beim Beurteilen des Zustands einer Brücke minimiert werden. Der Roboter erlaubt zudem auch eine genauere Analyse da er eine exakte Lokalisierung und präzise Ablage ermöglichen kann. Zudem können Funktionen zum Erstellen von Karten auf dem Roboter genutzt werden, die direkt in eine Modellierung des Ist-Zustands der Brücke einfließen können.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Personalkosten mit anvisierten 43,5 Personen-Monaten für wissenschaftliche Mitarbeiter („WiMi“) konnten gemäß Projektplan gut besetzt werden, im Zuge der vollzogenen kostenneutralen Verlängerung und Aufstockung kamen insgesamt 50,5 Personen-Monate „WiMi“ zum Einsatz (+16% als geringfügige Abweichung); im Gegenzug kam es lediglich zu marginalen Einsätzen von studentischen Hilfskräften, da die Aufgaben sich etwas anders entwickelten und besser von den vorgenannten Wissenschaftlern übergreifend abzudecken waren. Weiterhin wurden 2016/2017 zwei studentische Projekte mit nachfolgenden Abschlussarbeiten vergeben, die kostenfrei im Rahmen von Studienleistung der Studenten Qifan Shu und Stefan Bogdan durchgeführt wurden:

Robot Station Keeping with Imaging Sonar System
Qifan Shu, Projekt & BSc Thesis, 2016/2017

Visual Servoing for an Underwater Remotely Operated Vehicle
Stefan Bogdan, Projekt & BSc Thesis, 2016/2017

Das Personalbudget insgesamt wurde in der vorgenannten Umverteilung zielgenau im Projektsinne zu 99,9% genutzt (der Antragswert betrug 247.158 EUR; die IST-Abrechnung 246.882 EUR).

Laut Geräteliste wurde im Jahr 2015 das ARIS Sonargerät, das VideoRay ROV als Trägerplattform, die Tecnadyne Thruster als Booster und ein Rugged Laptop gemäß Antrag, bzw. überarbeitetem Hardwarekonzept angeschafft (netto 123,7 TEUR versus Budget 112,9 TEUR; geringfügige Abweichung 9,6% wegen Preisänderungen bzw. Wechselkurs; Lieferant aus den USA). Der frühzeitig erkannte Mehrbedarf in dieser Position konnte aus Einsparungen in den anderen Sachmittelpositionen ausgeglichen werden. Zwei Schlauchwagen für insgesamt ca. 200,- Euro wurden zu Kabelträgern für das Tether des Systems umgebaut.

Reisekosten waren anfangs (2015 und 2016) wegen der verschobenen Kooperationsmeetings geringer ausgefallen; 2017 und 2018 dann planmäßig; insgesamt 18 TEUR (versus Anfangsbudget 24 TEUR => 75%-Verbrauch). Neben den neun Projekttreffen in Deutschland und zwei Treffen in Indien, fielen Reisekosten für die Vorstellung des Projekts und darin erzielter Teilergebnisse zu einer nationalen

Veranstaltung (Innovationsforum Zivile Sicherheit, 2018) und vier internationalen Konferenzen (IEEE ICRA, IEEE IROS, IEEE Oceans, IFAC CAMS) an.

An Sachmitteln wurden grob im Einklang zum Projektplan Verbrauchsmaterial 8,4 TEUR (versus Budget 12,7 TEUR) zum Betrieb und zur Wartung des Systems während der Laborversuche und insbesondere der Feldtests zielführend eingesetzt.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Forschungsarbeiten im Teilvorhaben TV4 sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung entsprachen und alle im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden.

2.4 Nutzen und insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Marine Roboter mit (teil-)autonomen Fähigkeiten sind in den letzten Jahren zunehmend für kommerzielle Inspektionsaufgaben genutzt, bzw. zu mindestens in Erwägung gezogen worden. Es gibt daher das Potential, dass das Teilprojekt das Interesse von Unternehmen weckt die Kooperationen mit der Jacobs University in diesem Bereich anstreben werden, was zu einer Erhöhung der Drittmittelfähigkeit und zu Möglichkeiten der Lizenzierung der in dem Projekt erforschten Software- und Systemteile führen wird. Die Projektergebnisse können zur wirtschaftlichen Verwertung in Kooperation mit einem geeigneten Unternehmenspartner unter anderem zur regulären Unterwasserinspektion von Brücken weiter entwickelt werden – für diesen Anwendungsbereich gibt es ein wirtschaftliches Potential auch außerhalb von Flutereignissen. Gleiches gilt für weitere mögliche Anwendungsfelder wie die (teil-)autonome Inspektion von Off-Shore-Energieanlagen oder Häfen. Die Jacobs Robotics Group ist z.Zt. auch in Verhandlungen mit der Tokyo Electric Power Company (TEPCO) für einen Industrieauftrag im Kontext von Unterwasserinspektionsaufgaben an Offshore-Windkraft-Anlagen.

Insbesondere lassen sich für die Erfolgsaussichten im wirtschaftlichen Bereich vier Punkte benennen die von allgemeinem volkswirtschaftlichem Nutzen bei der Bekämpfung von Hochwassergefahren sind:

a. Minimierung von Fehleinschätzungen bzgl. des Zustands von Brücken

Die Verwendung eines Marineroboters mit bildgebendem Sonar erlaubt die Erfassung der Unterwasserlage an Brücken und somit wichtige Informationen bzgl. möglicher Unterspülungen, feststehendem Treibgut, etc. Dadurch wird die Zustandserfassung während oder nach Fluten dieser kritischer Infrastrukturen signifikant verbessert.

b. Verringerung der Gefährdung von Einsatzkräften

Menschliche Taucher können auch für eine in situ Inspektion von Brücken eingesetzt werden. Diese gehen allerdings sehr hohe Risiken ein da sie unter schlechten Sichtverhältnissen und unter unvollständig bekannten Umgebungsbedingungen arbeiten müssen. Das mögliche Vorhandensein von Treibgut, instabile Teilstrukturen, Unterspülungen und komplexe Strömungsverhältnisse stellen große Gefahren für Taucher dar. Die Verwendung eines Roboters ist daher eine sinnvolle Alternative.

c. Digitale Weitergabe von Missionsdaten an Experten und Lagezentren

Taucher können bestenfalls eine subjektive, grobe Erfassung der Lage unter Wasser liefern. Durch die Verwendung eines auf einem Roboter basierten digitalen Gesamtsystems können qualitativ hochwertige Missionsdaten an Lagezentren und auch an hochspezialisierte Experten zur Beurteilung übermittelt werden die sich nicht direkt vor Ort befinden.

d. Archivierung von Missionsdaten für Folge- und Langzeitplanungen

Die digitalen Daten die während oder kurz nach einem akuten Flutereignis erhoben werden können auch archiviert, bzw. Dritten zur Verfügung gestellt werden um Planungen zur Verhinderung von Folgeschäden und der Vorbeugung von Effekten bei späteren Ereignissen zu unterstützen.

Das zentrale wissenschaftliche Ergebnis ist ein Marineroboter zur Unterwasserinspektion von Brücken. Dieses System beinhaltet – neben seinem hochinnovativen Gesamtcharakter – auch verschiedene wissenschaftliche Teilergebnisse. Dazu gehören z.B. Beiträge zur Registrierung von Sonardaten, u.a. durch Erweiterung eigener Forschungsarbeiten zu Spektralen Methoden, sowie Beiträge zur Erstellen von 2D und 3D Unterwasserkarten von komplexen Strukturen. Als technische Ergebnisse sind Beiträge zur Aufarbeitung von Imaging Sonardaten und die Darstellung von und Interaktion mit Repräsentationen der Missionsdaten in Echtzeit zu nennen.

2.5 Projektrelevante Fortschritte bei anderen Stellen innerhalb des Förderzeitraums

Es sind uns keine Arbeiten oder Ergebnisse Dritter bekannt im Projektzeitraum bekannt, die für die Durchführung des Vorhabens relevant waren.

2.6 Veröffentlichungen des Ergebnisses

Das FloodEvac Projekt im Allgemeinen sowie das TV4 im Besonderen wurde in verschiedenen Vorträgen und Ausstellungen sowohl der Allgemeinheit wie auch dem Fachpublikum vorgestellt:

Andreas Birk. Mit Robotern auf Tauchstation
Fenster zur Wissenschaft, SPICARIUM, Bremen May 2015

Austellung des FloodEvac Marine Roboters & Poster
BMBF-Stand, 12. Europäischen Katastrophenschutzkongress
Berlin, September 2016

Andreas Birk. Mit Robotern auf Tauchstation: Maschinelle Intelligenz unter Wasser
Haus der Wissenschaft, Bremen, November 2017

Andreas Birk. Underwater Bridge Inspection in the Context of Flood Disasters
International Conference on Robotics and Automation. WS on Disaster Response
Robots: Design Principles and Control for Effective Mobility and Manipulation
Sands Expo and Convention Centre, Singapore, Juni 2017

Weiterhin sind vier Konferenzveröffentlichungen zu dem Projekt erschienen, die auch auf den entsprechenden Veranstaltungen über Vorträge präsentiert wurden:

Maik Benndorf, Maximilian Garsch, Christian Atanas Mueller, Tobias Fromm, Thomas Haenselmann, Norbert Gebbeken, Tomasz Luczynski, Andreas Birk. Robotic Bridge Statics Assessment Within Strategic Flood Evacuation Planning Using Low-Cost Sensors. IEEE Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR). Shanghai, China. 2017

Arturo Gomez Chavez, Christian A. Mueller, Tobias Doernbach, Davide Chiarella and Andreas Birk. Robust Gesture-Based Communication for Underwater Human-Robot Interaction in the context of Search and Rescue Diver Missions. WS on Human Aiding Robotics, International Conference on Intelligent Systems and Robots (IROS), Madrid, Spain, 2018

Christian A. Mueller, Tobias Fromm, Heiko Buelow, Andreas Birk, Maximilian Garsch, Norbert Gebbeken. Robotic Bridge Inspection Within Strategic Flood Evacuation Planning. IEEE Oceans. Aberdeen, UK, IEEE Press, 2017

Tobias Doernbach, Arturo Gomez Chavez, Christian A. Mueller and Andreas Birk. High-Fidelity Underwater Perception Using Simulation in the Loop. IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems (CAMS), 2018

Zwei der Veröffentlichung zum TV4 haben starke Bezüge zu anderen Teilvorhaben im Gesamtprojekt, insbesondere TV3 der Universität der Bundeswehr München (sowohl in der Oceans 2017 als auch in der SSRR 2017 Publikation) und TV5 der Hochschule Mittweida (in der SSRR 2017 Publikation).

Weitere Veröffentlichungen, insbesondere eine Journal Publikation sind z.Zt. in Bearbeitung. Neben den gedruckten Veröffentlichung wurden auch verschiedene Multimediamaterialien erstellt.

3 Erfolgskontrollbericht (in der nicht öffentlichen Fassung)

1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen, z.B. des Förderprogramms - (ggf. unter Angabe des Schwerpunkts) - soweit dies möglich ist

Das wesentliche Ziel des Projekts und der Kooperation zwischen indischen und deutschen Partnern ist die Erhöhung der zivilen Sicherheit der Bevölkerung in beiden Ländern durch Entwicklung innovativer Lösungen gemäß der unterzeichneten gemeinsamen Absichtserklärung (11.04.2013). Dieses wurde durch mehrere Treffen in Deutschland wie auch insbesondere in Indien und den damit verbundenen Erfahrungsaustausch realisiert.

Weiterhin zeigt das im Teilprojekt „Unterwasserinspektion durch einen Marineroboter“ entwickelte Gesamtsystem das Potential für eine effiziente und sichere Inspektion von kritischen Strukturen unterhalb der Wasserlinie, insbesondere in Hinblick auf Blockaden und Unterspülungen. Dies ermöglicht die Beurteilung der sicheren Nutzung von insbesondere Transportwegen für Evakuierungen und Hilfsmaßnahmen. Die erhobenen Daten können weiterhin für Langzeitplanung und Folgenabschätzungen genutzt werden wie insbesondere durch die Verzahnung mit dem Teilvorhaben „TV3 Bewertung kritischer Transportinfrastrukturen (TransInfra)“ und die darüber erfolgende Verlinkung mit den Teilvorhaben „TV2 Hochwassermodellierung und Überschwemmungsflächen (HWMMod)“ und „TV6 Robuste Evakuierung und Zivile Sicherheitsplanung (RobEZiS)“ gezeigt wurde.

2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen

Da im Erfolgskontrollbericht auf Abschnitte des Abschlussberichts verwiesen werden kann (Nr.3.3 BNBest-BMBF), wird hier primär auf die eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses in Abschnitt 2.1 des Abschlussberichts verwiesen. Im Folgenden ist eine Zusammenfassung aufgeführt.

Der Marineroboter zur Unterwasserinspektion erforderte die mechanische und elektronische Integration verschiedener Hardwarekomponenten – insbesondere eines kommerziellen Antriebssystems in Form eines Unmanned Underwater Vehicles (UUV) als mobile Plattform, eines bildgebenden Sonars, eines Versorgungs- und Kommunikationskabelsystems sowie einer Bedieneinheit aus Interfacebox und gehärtetem Laptop. Aufgrund von Problemen bei der Offenlegung der Schnittstellen bei dem ursprünglich im Antrag vorgesehenen UUV wurde ein überarbeitetes Konzept für die Hardwarekomponenten notwendig und erfolgreich umgesetzt.

Ein hochauflösendes bildgebendes Multibeam Sonar oder kurz Imaging Sonar ist eine wichtige Komponente bei der Umsetzung des Teilvorhabens. Konkret wurde ein Sound Metrics ARIS-3000 verwendet. Für die Systemintegration wurden ROS Treiber für die ARIS Anbindung unter Linux entwickelt. Dies wurde durch Arbeiten zur Noise Reduction und zum Image Enhancement durch Computer Vision Filter sowie Entwicklungen zur Visualisierung ergänzt. In umfangreichen Labor- und Feldtests wurden Versuche zur Leistungsfähigkeit des Geräts, insbesondere in Hinblick auf die Aufgabenstellung des Vorhabens, durchgeführt. Das ARIS 3000 hat eine theoretische maximale Auflösung von 3 mm. Allerdings haben Labortests gezeigt, dass die reale Auflösung selbst mit optimal eingestellten Parametern im Bereich von einigen Zentimetern ist. Damit ist das Gerät nichtdestotrotz für die vorgesehenen Einsatzzwecke durchaus gut geeignet, da die Auflösung zur Detektion von Unterspülungen und von verkeiltem Treibgut sehr gut geeignet ist. Weiterhin haben Feldversuche gezeigt, dass selbst bei einer Sicht von <20 cm im Wasser keine Auswirkungen auf die Bildqualität des Sonars zu erkennen ist. Dies bestätigt das sehr gute Potential des bildgebenden Sonars bei sehr schlechten Sichtverhältnissen, die als Standardbedingungen bei deutschen Binnengewässern angesehen werden müssen.

Weiterhin wurde Software zur Unterstützung der grundlegenden Funktionen zur Roboterkontrolle und der Bedienerassistenzfunktionen sowie der Bewegungssteuerung durch Vektorkommandos unter dem Robot Operating System (ROS) auf Ubuntu Linux entwickelt.

Darauf aufbauend erfolgten Arbeiten zur einfacheren Steuerung durch z.B. Endnutzer. Es wurden u.a. Arbeiten zum visual Servoing mittels der Sonardaten durchgeführt. Insbesondere wurden über lokale improved Fourier Mellin Invariant (iFMI) Registrierung Bewegungsvektoren geschätzt, die es erlauben, die Komponenten der Eigenbewegung des Roboters zu schätzen. Auf dieser Basis ist eine Bewegungskompensation möglich, die der Implementierung der Bedienerassistenzfunktionen wie insbesondere dem Station Keeping dienen.

Die Aufarbeitung der an verschiedenen Stellen aufgenommenen Sonarbilder zu konsistenten räumlichen Repräsentationen ist aus zwei unterschiedlichen Gründen von großem Interesse, nämlich 1) als Basis für intelligente autonome Fahrerassistenzfunktionen und 2) als wichtige Missionsergebnisse die eine erheblich bessere Zustandsbestimmung erlauben als einzelne Sonarbilder. Dies erfordert die Verwendung von Registrierungsmethoden, d.h. die maschinelle Detektierung und räumliche Inbezugsetzung ähnlicher Regionen in den aufbereiteten Sensordaten. Dafür konnte eine spezielle spektrale Registrierungsmethode in Form von der improved Fourier Mellin Invariant (iFMI) erfolgreich an Imaging Sonar Daten angepasst werden. Auf dieser Basis konnten in Feldversuchen Karten rein durch Registrierung erzeugt werden. Weiterhin konnten Ergebnisse zum maschinellen Erkennen von 3D Strukturen in 2D Sonarbildern erzielt werden. Dafür wurde iFMI Registrierung auf Subwindows der Sonardaten angewendet.

Zum Evaluieren der Ergebnisse wurden mehrfach Feldtests des Demonstratorsystems durchgeführt, u.a. an der Karl Carstens Brücke in Bremen. Neben der allgemeinen Funktionstüchtigkeit des Systems und seiner einzelnen Komponenten, wurde insbesondere gezeigt das bei geringer, bzw. de facto nicht vorhandener Sicht (<20 cm) verwertbare Aufnahmen mit dem bildgebenden Sonar gemacht und Karten erstellt auf den mögliche Unterspülungen oder Verklausungen erkennbar wären.

Über den ursprünglichen Arbeitsplan hinaus, wurden Synergieeffekte genutzt und Versuche mit einem bereits vorhandenem mobilen Roboter mit Greifarm unternommen, um in Kooperation mit der Universität der Bundeswehr München (TV3) und der Hochschule Mittweida (TV5) Versuche mit Smartphones als kostengünstige Vibrationssensoren durchzuführen.

3. Fortschreibung des Verwertungsplans.

3.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Es wurden keine Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen angemeldet.

3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Der Einsatz von Marinerobotern in Schutz- und Rettungsanwendungen ist noch stark durch Forschungsaktivitäten geprägt, d.h. auch wenn sich durchaus ein hohes wirtschaftliches Verwertungspotential abzeichnet, ist die wirtschaftliche Nutzung im Kontext von Unterwasserinspektionsaufgaben zur Zeit noch auf Nischenanwendungen und -anbieter beschränkt. Dies gilt insbesondere für das Themengebiet der Inspektion von Brücken, bei der die Begutachtung oberhalb der Wasserlinie überwiegt. Allerdings besteht die Möglichkeit der Übertragung von Teilergebnissen aus dem Vorhaben in themennahe wirtschaftliche Verwertungsmöglichkeiten.

Es ist daher zu erwarten, dass das Teilprojekt das Interesse von Unternehmen weckt, die Kooperationen mit der Jacobs University in diesem Bereich anstreben werden, was zu einer Erhöhung der Drittmittelfähigkeit und zu Möglichkeiten der Lizenzierung der in dem Projekt erforschten Software- und Systemteile führen wird. Die Projektergebnisse können zur wirtschaftlichen Verwertung in Kooperation mit einem geeigneten Unternehmenspartner unter anderem zur regulären Unterwasserinspektion von Brücken weiter entwickelt werden – für diesen Anwendungsbereich gibt es ein wirtschaftliches Potential auch außerhalb von Flutereignissen. Gleiches gilt für weitere mögliche Anwendungsfelder wie die (teil-)autonome Inspektion von Off-Shore-Energieanlagen oder Häfen.

Die Jacobs Robotics Group ist z.Zt. in Verhandlungen mit der Tokyo Electric Power Company (TEPCO) für einen Industrieauftrag im Kontext von Unterwasserinspektionsaufgaben an Offshore-Windkraft-Anlagen.

3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Das zentrale wissenschaftliche Ergebnis ist ein Marineroboter zur Unterwasserinspektion von Brücken. Dieses System beinhaltet – neben seinem hochinnovativen Gesamtcharakter – auch verschiedene wissenschaftliche Teilergebnisse. Dazu gehören z.B. Beiträge zur Registrierung von Sonardaten, u.a. durch Erweiterung eigener Forschungsarbeiten zu Spektralen Methoden, sowie Beiträge zur Erstellen von Unterwasserkarten von komplexen Strukturen mit Sonar. Als technische Ergebnisse sind Beiträge zur Aufarbeitung von Imaging Sonardaten und die Erstellung eines GUI zur Darstellung von und Interaktion mit Repräsentationen der Missionsdaten in Echtzeit zu nennen.

3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Folgende generelle Verwertungsmöglichkeiten für Wissenschaft und Anwendungen bestehen:

- Das Grundkonzept eines Gesamtsystems aus Marineroboter mit bildgebendem Sonar und darauf aufbauender Datenverarbeitung ist auch auf andere Anwendungsfelder zur Inspektion menschengemachter Unterwasserstrukturen übertragbar.
- Die Beiträge zur Registrierung von Sonardaten und zum Erstellen von 2D sowie 3D Karten sind generell für marine Anwendungen von Interesse
- Das spezifische Gesamtsystem das im Rahmen dieses Teilvorhaben erarbeitet wurde kann auch für Unterwasserbrückeninspektionen unabhängig von Flutereignissen – z.B. zum Planen von Baumaßnahmen oder für Wartungsarbeiten – genutzt werden.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Es gab keine Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben. Wie erwähnt, gab es Probleme bei der Offenlegung der Schnittstellen bei dem ursprünglich im Antrag als Trägerplattform vorgesehenen UUV als dieses beschafft werden sollte. Daher wurde ein überarbeitetes Konzept für die Hardwarekomponenten notwendig das zeitnah erstellt wurde. Dieses überarbeitete Konzept wurde in Rücksprache mit dem Projektträger zur erfolgreichen Beschaffung der notwendigen Komponenten im ersten Projektjahr verwendet und die darauf beruhenden sowie die weiteren geplanten Arbeiten wurden erfolgreich umgesetzt.

5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Neben den erfolgten und geplanten Publikationen, wurden die in dem Projekt erzielten Ergebnisse bei verschiedenen Vorträgen für Fachpublikum sowie der Allgemeinheit vorgestellt. Weiterhin wurden verschiedene Multimediamaterialien erstellt mit denen mögliche Nutzer erreicht werden können.

6. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Alle Ergebnisse wurden unter Einhaltung der vorgegebenen Ausgaben- und Zeitplanung erbracht.

4 Kurzfassung – Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht	
3. Titel BMBF-Verbundprojekt: Verletzlichkeit von Transportinfrastrukturen, sowie Warnung und Evakuierung im Falle von großräumigen Hochwasserereignissen im Inland Akronym: FloodEvac Teilvorhaben 4: Unterwasser Roboter (UUV)		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr. Birk, Andreas Dr. Müller, Christian Atanas Dr. Bülow, Heiko Chavez, Arturo Gomez	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2018	
	6. Veröffentlichungsdatum 28.06.2019	
	7. Form der Publikation Report	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Teilvorhaben 4: Jacobs University Bremen gGmbH Robotics Group Department of Computer Science and Electrical Engineering	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -	
	10. Förderkennzeichen 13N13197	
	11. Seitenzahl 32	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 12	
	14. Tabellen 1	
	15. Abbildungen 18	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) VDI Technologiezentrum GmbH, Dr. Jan Bornemeier, VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf – Juni, 2019		
18. Kurzfassung Brücken sind kritische Transportinfrastrukturen bei Fluten. Sie sind sehr wichtig für die Katastrophenlogistik und Evakuierungen, aber gleichzeitig werden sie von der Flut oft erheblich in Mitleidenschaft gezogen. Der Stand der Technik zur Beurteilung möglicher Schäden beruht auf Inspektionen oberhalb der Wasserlinie – was eine hohe Unsicherheit zur Folge hat – oder in der Verwendung von Tauchern – was sehr hohe Risiken für die Taucher beinhaltet und nur zu informellen Berichten über die Situation unter Wasser genutzt werden kann. Dieses Teilvorhaben beschäftigte sich daher mit der Nutzung eines neuartigen Konzepts eines Marineroboters zur effizienten und sicheren Inspektion von Brücken im Kontext von Flutkatastrophen. Dafür wurde ein Gesamtsystem aus einem Unmanned Underwater Vehicle (UUV) mit bildgebenden Sonar und ein darauf aufbauendes Softwarepaket entwickelt. Neben den Arbeiten zur Systementwicklung und -integration, wurden Methoden und Software entwickelt, die zur Aufarbeitung der Sonardaten durch Verfahren zur Signalverbesserung dienen. Darauf aufbauend wurden sowohl intelligente autonome Teilfunktionen zur Bedienerassistenz als auch Methoden zur räumlichen Informationsintegration, d.h. zur Erstellung von lokalen Karten, erfolgreich erforscht. Es konnte u.a. in Feldversuchen gezeigt werden, dass mit dem Ansatz Unterwasserkarten erstellt werden konnten, in denen mögliche Verkolkungen oder Veklausungen an Brücken erkannt werden können. Dies ist insbesondere bei extrem schlechten Sichtverhältnissen möglich, die die Standardbedingungen bei deutschen Gewässern darstellen, d.h. unter Bedingungen die eine visuelle Inspektion durch Taucher oder mit Kameras unmöglich machen.		
19. Schlagwörter Robotik, Brückeninspektion, Unmanned Underwater Vehicle (UUV), Imaging Sonar, Teilautonomie, Unterwasserkarten		
20. Verlag -	21. Preis -	

5 Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN -	2. type of document (e.g. report, publication) Abschlussbericht	
3. title BMBF-Verbundprojekt: Vulnerability of Transportation Structures, Warning and Evacuation in Case of Major Inland Flooding. Cooperation in Civil Security Research between India and Germany Acronym: FloodEvac Teilvorhaben 4: Marine Robot (UUV)		
4. author(s) (family name, first name(s)) Prof. Dr. Birk, Andreas Dr. Müller, Christian Atanas Dr. Bülow, Heiko Chavez, Arturo Gomez	5. end of project 31.12.2018	
	6. publication date 28.06.2019	
	7. form of publication report	
7. performing organization(s) (name, address) Teilvorhaben 4: Jacobs University Bremen gGmbH Robotics Group Department of Computer Science and Electrical Engineering	9. originator's report no. -	
	10. reference no. 13N13197	
	11. no. of pages 32	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 12	
	14. no. of tables 1	
	15. no. of figures 18	
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date) VDI Technologiezentrum GmbH, Dr. Jan Bornemeier, VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf – June, 2019		
18. abstract Bridges are critical transport infrastructures during floods. They are very important for disaster logistics and evacuations, but they are at the same time often badly affected by the flood. The state of the art for assessing potential damage is based on inspections above the waterline - resulting in high uncertainty - or in the use of divers - which involves very high risks for the divers and is only leads to informal reports. This sub-project therefore dealt with the use of a novel concept of a marine robot for the efficient and safe inspection of bridges in the context of flood disasters. For this purpose, an integrated system consisting of a Unmanned Underwater Vehicle (UUV) with imaging sonar and a software package for control, data processing, and visualization were developed. In addition to the work on system development and integration, methods and software were developed to process the sonar data by means of signal enhancement procedures. Based on this, intelligent autonomous functions for operator assistance and methods for spatial information integration, i.e., methods. to create local maps, were successfully researched. It was shown in among others in field tests that underwater maps could be created that are suited to detect possible scouring or jams. This is even possible in extremely poor visibility conditions, which are the standard conditions in German waters, i.e., in conditions that make a visual inspection by divers or with cameras impossible.		
19. keywords Robotics, Bridge Inspection, Unmanned Underwater Vehicle (UUV), Imaging Sonar, Semi-Autonomy, Underwater Mapping		
20. publisher -	21. price -	

6 Literatur

[SML09] E. Steimle, R. Murphy, M. Lindemuth, and M. Hall, "Unmanned marine vehicle use at hurricanes wilma and ike," in OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges, 2009, pp. 1–6.

[MDN11] R. R. Murphy, K. L. Dreger, S. Newsome, J. Rodocker, E. Steimle, T. Kimura, K. Makabe, F. Matsuno, S. Tadokoro, and K. Kon, "Use of remotely operated marine vehicles at minamisanriku and rikuzentakata japan for disaster recovery," in Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2011 IEEE International Symposium on, 2011, pp. 19–25.

[RWH10] S. Reed, J. Wood, and C. Haworth, "The detection and disposal of ied devices within harbor regions using auvs, smart rovs and data processing/fusion technology," in Waterside Security Conference (WSS), 2010 International, 2010, pp. 1–7.

[RoBa09] A. Rodningsby and Y. Bar-Shalom, "Tracking of divers using a probabilistic data association filter with a bubble model," Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, vol. 45, no. 3, pp. 1181–1193, 2009.

[KeHo06] R. T. Kessel and R. D. Hollett, "Underwater intruder detection sonar for harbour protection: State of the art review and implications," in Second IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security and Safety, 2006.

[BPM05] N. Le Bouffant, P. Pidsley, J.-P. Malkasse, and F. Florin, "Automatic mcm mission control for auv systems," in Oceans 2005 - Europe, vol. 2, 2005, pp. 930–936 Vol. 2.

[MEJ03] J. Morrison, B. Evans, T. James, and K. Allen, "Gambit mcm auv: overview and system performance," in OCEANS 2003. Proceedings, vol. 3, 2003, pp. 1723–1729 Vol.3.

[DeV00] J. DeVault, "Robotic system for underwater inspection of bridge piers," Instrumentation and Measurement Magazine, IEEE, vol. 3, no. 3, pp. 32–37, 2000.

[MSL09] R. Murphy, E. Steimle, M. Hall, M. Lindemuth, D. Trejo, S. Hurlebaus, Z. Medina-Cetina, and D. Slocum, "Robot-assisted bridge inspection after hurricane ike," in Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR), 2009 IEEE International Workshop on, 2009, pp. 1–5.

[BGM17] Maik Benndorf, Maximilian Garsch, Christian Atanas Mueller, Tobias Fromm, Thomas Haenselmann, Norbert Gebbeken, Tomasz Luczynski, Andreas Birk. Robotic Bridge Statics Assessment Within Strategic Flood Evacuation Planning Using Low-Cost Sensors. IEEE Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR). Shanghai, China. 2017

[CMD18] Arturo Gomez Chavez, Christian A. Mueller, Tobias Doernbach, Davide Chiarella and Andreas Birk. Robust Gesture-Based Communication for Underwater Human-Robot Interaction in the context of Search and Rescue Diver Missions. WS on Human Aiding Robotics, International Conference on Intelligent Systems and Robots (IROS), Madrid, Spain, 2018

[MFB17] Christian A. Mueller, Tobias Fromm, Heiko Buelow, Andreas Birk, Maximilian Garsch, Norbert Gebbeken. Robotic Bridge Inspection Within Strategic Flood Evacuation Planning. IEEE

[DCM18] Tobias Doernbach, Arturo Gomez Chavez, Christian A. Mueller and Andreas Birk. High-Fidelity Underwater Perception Using Simulation in the Loop. IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems (CAMS), 2018

7 Abkürzungsverzeichnis

UUV	Unmanned Underwater Vehicle
USV	Unmanned Surface Vehicle
ROV	Remotely Operated Vehicle
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
HW	Hardware
SW	Software

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Abbildung 1: Verzahnung des Teilvorhabens „TV4 Unterwasser Roboter (UUV)“ mit dem Teilvorhaben „TV3 Bewertung kritischer Transportinfrastrukturen (TransInfra)“ und die darüber erfolgende Verlinkung mit den Teilvorhaben „TV2 Hochwassermodellierung und Überschwemmungsflächen (HWMMod)“ und „TV6 Robuste Evakuierung und Zivile Sicherheitsplanung (RobEZiS)“.	6
Abbildung 2:	Abbildung 2: Links: Abgebrochens Teil einer Kaianlage mit Geländer das sich am Fuß der Marco Island Brücke nach Hurrikan Wilma verkeilt hat (aus [SML09]). Rechts: Treibgut in der Nähe eines gefluteten Hauses nach dem Tohoku Tsunami (aus [MDN11]).	6
Abbildung 3:	Abbildung 3: Übersicht der Systemkomponenten	9
Abbildung 4:	Abbildung 4: Übersicht der Systemarchitektur	10
Abbildung 5:	Abbildung 5: Interface Box zwischen Bediener-Laptop und Vehicle	10
Abbildung 6:	Abbildung 6: Das Unmanned Surface Vehicle (USV) "Muddy Waters II" als Trägerplattform.	11
Abbildung 7:	Abbildung 7: Labortests mit dem ARIS 3000 bildgebenden Sonar.	12
Abbildung 8:	Abbildung 8: Daten des ARIS Sonars unter extremen Sichtbedingungen: ein versenkter Baumstumpf (links) ist im Kamerabild nicht erkennbar (Mitte) während er im Sonarbild erscheint (rechts).	13
Abbildung 9:	Abbildung 9: Daten des ARIS 3000 von einem Feldtest an einer Brücke.	13
Abbildung 10:	Abbildung 10: Softwaretreiber für Roboterkontrolle und Bedienerassistenzfunktionen	14
Abbildung 11:	Abbildung 11: Motion Estimation Vektoren (in Rot) die die über Registrierung geschätzte Eigenbewegung des Roboters anzeigen.	15
Abbildung 12:	Abbildung 12: Zwei Beispiele für iFMI Registrierung von Sonardaten	16
Abbildung 13:	Abbildung 13: Karte die durch iFMI Registrierung aus einer Sequenz von Sonardaten berechnet wurde	16
Abbildung 14:	Abbildung 14: Erkennen von 3D Strukturen in 2D Sonarbildern durch iFMI Registrierung	16
Abbildung 15:	Abbildung 15: Feldversuche an der Karl Carstens Brücke.	17
Abbildung 16:	Abbildung 16: Karl Carstens Brücke in Bremen.	17
Abbildung 17:	Abbildung 17: Mobiler Roboter mit Greifarm der Jacobs University.	18
Abbildung 18:	Abbildung 18: Eine durch 3D-Druck erzeugte Hülle (links) erlaubt das autonome Ausbringen von Smartphones durch den Roboterarm (rechts).	18

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vergleich von Optionen für das Imaging Sonar. Kritischer Parameter ist die notwendige räumliche Auflösung die eine Inspektion von Unterwasserstrukturen erlaubt. Diese wird nur einem Gerät auf dem Markt erreicht, nämlich einem ARIS-3000.	11
------------	--	----