Christian Renner, Jan Heitmann, Erik Maehle, Cedric Isokeit, Benjamin Meyer, Philipp Rühmer, Uwe Leineweber, Peter Gutt, and Andrea Desel. Automatische Ortung von Gefahrenstoffen im Hafenbecken. In Proc. of the 29th Hamburger Kolloquium zur Abwasserwirtschaft, Hamburg, Germany, Sept. 2017.

Automatische Ortung von Gefahrenstoffen im Hafenbecken

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Christian Renner, Jan Heitmann
Arbeitsgruppe smartPORT, Technische Universität Hamburg
Am Irrgarten 3–9, 21073 Hamburg
E-Mail: {christian.renner,jheitmann}@tuhh.de

Prof. Dr.-Ing. Erik Maehle, Cedric Isokeit, Benjamin Meyer
Institut für Technische Informatik, Universität zu Lübeck
Ratzeburger Allee 160, 23562 Lübeck
E-Mail: {maehle,isokeit,meyer}@iti.uni-luebeck.de

Gerd Seidel, Philipp Rühmer, Uwe Leineweber, Peter Gutt
Sea & Sun Technology GmbH
Arndtstr. 9–13, 24610 Trappenkamp
E-Mail: seidel@sea-sun-tech.com

Andrea Desel
Amt für Immissionsschutz und Betriebe (IB 3223), Hamburger Behörde für Umwelt und Energie
Neuenfelder Straße 19, 21109 Hamburg
E-Mail: andrea.desel@bue.hamburg.de

ZUSAMMENFASSUNG

Die Wasserbehörden der Freien und Hansestadt Hamburg sind für den Schutz der Gewässer im Stadtgebiet und des Hamburger Hafens zuständig. Für Routine-Messungen der Wasserqualität werden bereits bewährte Systeme, die an diversen Stellen im Bereich der Elbe installiert sind, im Rahmen des Wassergütemessnetzes des Hygienischen Institutes eingesetzt. Anders sieht es bei akuten Gewässerverunreinigungen aus. Hier ermöglichen technische Systemen aus Kleinstunterwasserfahrzeugen die flächendeckende, automatische Überwachung von Gewässern. Sie können einen wertvollen Beitrag bei der Schadensaufnahme und Identifikation von Gefahrenstoffen und -quellen leisten, die verbesserte und schnellere Aussagen u. a. zum Schadensausmaß, zum Schadstoff, zur Einleitungsquelle und zur Konzentration liefern können. Im Rahmen des MoSAIk-Projekts wird ein neuartiges System für den Einsatz im Katastrophen-

und Gewässerschutz erforscht. Das Projekt, die geplanten und die bereits abgeschlossenen Arbeiten werden im vorliegenden Artikel vorgestellt.

1 EINLEITUNG

Der Schutz von Gewässern und Hafengebieten, insbesondere im Rahmen von §32 (Reinhaltung oberirdischer Gewässer) des Wasserhaushaltsgesetztes (WHG), wird von lokalen Behörden wie der Behörde für Umwelt und Energie der Stadt Hamburg sichergestellt. Das Schadensmanagement hat zur wesentlichen Aufgabe, unerlaubte Einleitungen von wassergefährdenden Stoffen zu unterbinden und Maßnahmen zur Reinigung zum Schutze des Gewässers und zur Gefahrenabwehr im Rahmen der Sicherheit und Ordnung anzuordnen (z. B. Gefährdung von Trinkwasser und Badegewässern).

Bei akuten Schadensfällen in den Gewässern im Bereich des Hafens, der Elbe und im Stadtgebiet von Hamburg werden bis dato stationäre und eingeschränkt mobile Messverfahren eingesetzt. Die notwendigen Messungen werden dabei mithilfe von Messsonden durchgeführt, die von Land aus oder von Schiffen gezielt ins Wasser gelassen werden. Gelegentlich werden seitens der Verantwortlichen (Verursacher) oder der Feuerwehr (wenn Gefahr der Sicherheit und Ordnung besteht) Taucher zur Schadensaufnahme, -charakterisierung und -bekämpfung sowie zur Beweissicherung eingesetzt.

Dieses Vorgehen ist primär begründet in den hohen Stückkosten der notwendigen Messsonden bzw. der hohen Personalkosten bei mobilen Messungen und beim Einsatz von Tauchern unter Berücksichtigung des vergleichsweise seltenen Auftretens von gravierenden Schadensereignissen. Dieser Umstand zieht jedoch einige Unzulänglichkeiten nach sich. Stationäre Messsonden bieten nur eine geringe örtliche Auflösung und daher sowohl eine verminderte Detektionswahrscheinlichkeit als auch eine unzureichende Lokalisation der Quelle im Schadensfall. Der Einsatz mobiler Messsysteme erlaubt nur punktuelle Kontrollen mit geringer zeitlicher und örtlicher Auflösung. In vielen Fällen werden entsprechende Messungen aufgrund der hohen Kosten erst im Verdachtsfall oder nach Katastropheneintritt durchgeführt. Der Einsatz von Tauchern führt zu erheblichen Verzögerungen, u. a. wegen der Einhaltung von Protokollen zur Wahrung der Sicherheit der Taucher sowie wegen der schlechten Bedingungen für das Arbeiten in Tidegewässern; insbesondere der Elbe, die extreme Strömungsgeschwindigkeiten aufweist. Hier ist z. B. das Arbeiten nur im Stauwasser (maximal eine Stunde vor und nach Niedrigwasser) möglich. Aufgrund dieser Gegebenheiten können Gefahrensituationen erst nach deren Auftreten bekämpft werden. Eine Beweissicherung gestaltet sich in diesen Fällen oft als schwierig, wenn der Verursacher nicht zweifelsfrei identifiziert wer-

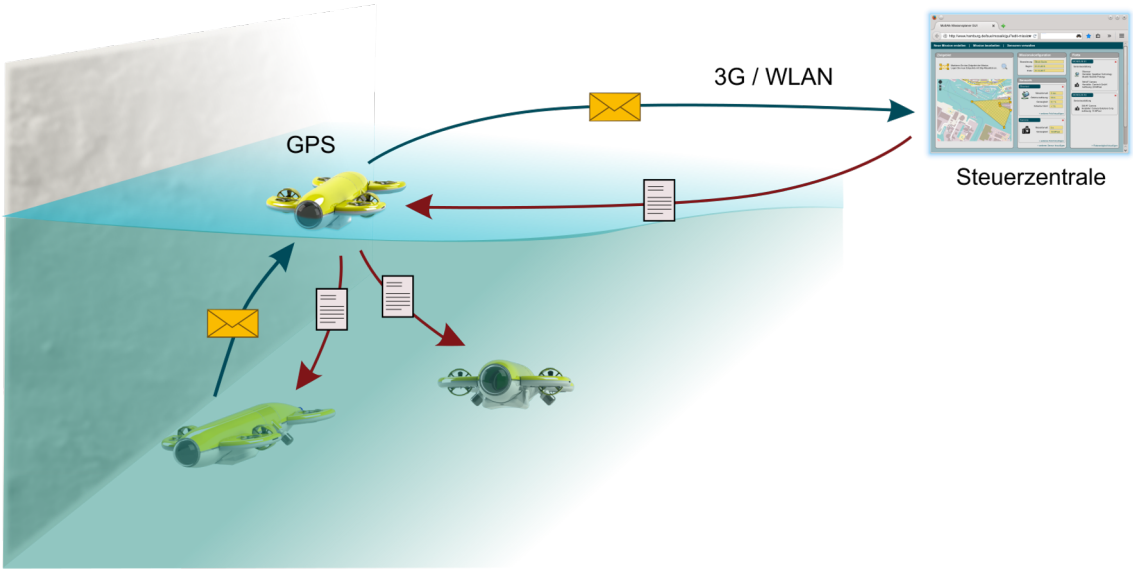

Abbildung 1: Systemarchitektur von MoSAIk: Ein aufgetauchtes autonomes Unterwasserfahrzeug dient als Kommunikations-Brücke zur Übersetzung drahtloser Funkkommunikation über Wasser zu akustischer Kommunikation unter Wasser. Von den AUVs erhobene Messdaten werden in einer Steuerzentrale graphisch dargestellt; gleichzeitig können Kommandos an AUVs verschickt werden. Die Lokalisation an der Wasseroberfläche geschieht mit herkömmlichem GPS, Unterwasserfahrzeuge lokalisieren sich auf Basis der GPS-Positionen und Distanzen zu Fahrzeugen an der Oberfläche sowie zueinander.

den kann oder den Hafen bzw. das Gewässer bereits verlassen hat. Gleichzeitig bergen viele Einsätze erhebliche Gefahren für die Taucher, z. B. beim Austritt giftiger Chemikalien.

Im Rahmen des BMBF-geförderten Verbundprojekts MoSAIK[1] wird ein technisches System bestehend aus kleinen, wendigen und kostengünstigen Unterwasserfahrzeugen und aufgabenspezifischer Sensorik konzeptioniert und erforscht (siehe Abb. 1). Die Roboter können Messungen sowohl an der Oberfläche als auch unter Wasser in verschiedenen Tiefen durchführen. Die Sensorik ist hierbei einerseits auf die Szenarien von Katastrophen in Häfen und Binnengewässern (z. B. Austritt von wassergefährdenden Stoffen) ausgelegt und andererseits dem Formfaktor und Energieverbrauch der Tauchroboter angepasst. Durch einen modularen Aufbau können neue Sensoren in das bestehende System integriert oder ausgetauscht werden. Durch die kleine Baugröße und das geringe Gewicht sind die Roboter flexibel einsetzbar und können problemlos transportiert und von Einsatzkräften bzw. Kontrolleuren getragen werden. Eine nutzerfreundliche Planungs- und Steuerungssoftware erleichtert den Einsatz durch Be-

[1]Mobiles Sensornetz zur autonomen und großflächigen Unterwasserortung und Identifikation von Gefahrenstoffen in Häfen und Binnengewässern

hörden wie dem assoziierten Partner, der Behörde für Umwelt und Energie der Stadt Hamburg.

2 STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK

2.1 Existierende Sicherheitsmaßnahmen

Aktuelle Sicherheitsmaßnahmen beschränken sich hinsichtlich der Prävention auf manuelle Kontrollen und stationäre sowie ggf. mobile Einzelpunktmessungen im Bedarfsfall (z. B. Entnahme von Umweltproben). Diese werden beispielsweise durch ein grobmaschiges Netz aus stationären Messpunkten oder per regelmäßiger oder unangekündigter Stichproben erhoben. Durch den Einsatz eines mobilen und autonomen Messsystems können einerseits Personalkosten gesenkt werden und andererseits viel höhere zeitliche sowie örtliche Auflösungen erreicht werden. Es ermöglicht somit eine bessere Früherkennung von Gefahren. Messungen sind außerdem weniger berechenbar, so dass das Risiko von Kontrollumgehungen reduziert werden kann. Eine mögliche Anwendung ist beispielsweise die Messung der Zusammensetzung von Abwassereinleitungen von Industrieanlagen in öffentliche Gewässer wie z. B. die Elbe.

Im Bereich der Gefahrenbekämpfung und Beweissicherung nach Unfällen wird zumeist auf manuelle, personalintensive Verfahren wie den Einsatz von Tauchern oder punktuelle Messungen durch Behörden zurückgegriffen. Konkrete Beispiele hierfür sind Beweissicherungen nach Tank- und Beladungsunfällen, die Identifizierung von Verunreinigungen durch langsames Leckschlagen permanent ankernder Schiffe (beispielsweise im Harburger Binnenhafen), industrielle Abwasservergehen oder Industrieunfälle wie kürzlich im chinesischen Tiangjin, wo eine Kontamination der angrenzenden Gewässer befürchtet wurde.

In diesen Szenarien verspricht das MoSAIk-System eine erhöhte Aufklärungsquote und eine sinnvolle Unterstützung der Rettungskräfte. So können diese einerseits Gefahrenlagen besser einschätzen, ohne sich selbst in Gefahr zu bringen, und andererseits trotz akuter Gefährdung mit steuerbaren Unterwasserrobotern nach Ursachen forschen oder Überlebende suchen.

2.2 Autonome Kleinstunterwasserfahrzeuge

Zum heutigen Zeitpunkt existiert eine Vielzahl verschiedener autonomer Unterwasserfahrzeuge, sog. AUVs (engl., “Autonomous Underwater Vehicles“), sowohl aus der Forschung (Hackbarth et al. 2015; University o.D.) als auch der Industrie (Hydromea 2015; Riptide Autonomous Solutions o.D.). Zu den wesentlichen Unterschieden zu MONSUN gehören u.a. dessen Modularität, sein durch langjährige Forschung erworbener technischer Vorsprung sowie ein existierendes Akustikmodem zur Unterwasserkommunikation. Andere verfügbare AUVs ver-

fügen über keine oder funkbasierte Kommunikation, die unter Wasser eine Reichweite von nur wenigen Metern ermöglicht.

2.3 Unterwasserkommunikation und -selbstlokalisation

Sowohl in Wissenschaft (Cario et al. 2015; Gallimore et al. 2010; Sanchez et al. 2012) als auch Wirtschaft (Evologics GmbH o.D.; Sonardyne o.D.; Teledyne Benthos o.D.; Tritech International Limited o.D.) wurden zahlreiche Akustikmodems für die Unterwasserkommunikation entwickelt. Aus der universitären Forschung hervorgegangene Modems bieten i. d. R. keine oder nur unzureichende Dokumentation. Eine Reproduktion ist häufig schwierig, auch weil im Handel nicht erhältliche Komponenten verwendet werden. Kommerzielle Modems eigenen sich aufgrund hoher Kosten und zu großer Abmessungen nicht für den Einsatz in MONSUN. Ferner basieren sie softwareseitig auf proprietären, nicht quelloffenen Schnittstellen und eignen sich daher nicht zur Grundlagenforschung in tieferen Schichten des ISO/OSI Modells.

Im Bereich der Lokalisation basieren typische Lösungsansätze auf Sonardaten, Trägheitsnavigationssystemen (INS, engl. Inertial Navigation System) und Ultraschall-Doppler-Profil-Strömungsmessern (DVL, engl. Doppler Velocity Log). Sie sind aufgrund hoher Kosten und des zusätzlich großen Formfaktors für Kleinstunterwasserfahrzeuge im Schwarmverbund nicht geeignet. Zur akustischen Unterwasserkommunikation und -lokalisation für kostengünstige Kleinst-AUVs wie MONSUN gibt es bislang nur wenige Arbeiten. So verwenden die in Abschnitt 2.2 zitierten AUVs bislang weitgehend Funktechnik, wodurch die Kommunikations- und Lokalisationsreichweite auf wenige Meter beschränkt ist. Ein erster vielversprechender Ansatz zur Lokalisierung ist in (Geist et al. 2016) dokumentiert.

2.4 Miniaturisierte, modulare Sensorik

Die in der Meerestechnik bislang eingesetzten Sensoren—sowohl für statische Messstationen als auch autonome Unterwasserfahrzeuge—sind durch ihren Einsatz im Ozean sehr groß und für den schweren Seeeinsatz konzipiert. Für den Bereich der Limnologie wird meistens von kleinen Booten aus gearbeitet, alleine aus diesem Grund sind die großen Systeme nicht einsetzbar. Aufgrund der geringen Abmessungen von MONSUN sind miniaturisierte Präzisionssensoren erforderlich, die so am Markt nicht verfügbar sind. Ferner werden Sensoren wie die CTD48 (Sea & Sun Technology GmbH o.D.) als vorkonfigurierte, kalibrierte Einheit vertrieben. Das Austauschen einzelner Sensormodule durch den Anwender ist nicht vorgesehen. Schließlich müssen die Sensoren an strömungsgünstigen Orten an bzw. in der Außenhülle von MONSUN integriert werden.

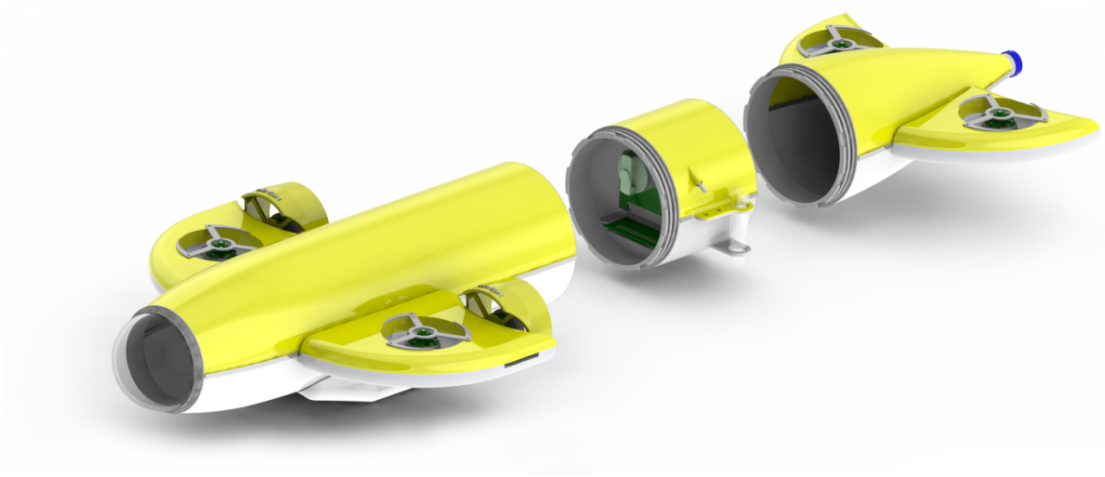

Abbildung 2: 3D-Model von MONSUN. Ohne Mittelteil ist das AUV ca. 60 cm lang und durch seine sechs Motoren besonders wendig. Das Mittelteil stellt eine prototypische Sensoreinheit mit nur einem Sensor dar.

3 TECHNISCHES KONZEPT

Im Folgenden wird das technische Konzept des MoSAIk-Projekts anhand der drei Projektsäulen erläutert.

3.1 Autonomes Unterwasserfahrzeug

Am Institut für Technische Informatik der Universität zu Lübeck wird das in Abb. 2 dargestellte AUV MONSUN (Meyer, Ehlers et al. 2014; Meyer, Renner et al. 2016) entwickelt, das im Fokus des MoSAIk-Projekts steht. MONSUN soll um eine modulare Sensoreinheit ergänzt werden, die den einfachen Austausch von anwendungsspezifischer Sensorik durch den Endanwender ermöglicht. Gleichzeitig werden unterschiedliche Konzepte zur Schwarminteraktion für Tauchroboter auf Basis von MONSUN erforscht. In diesem Kontext werden einerseits Algorithmen auf Basis absoluter Positionen und individueller Navigation sowie andererseits durch den Aufbau und die Aufrechterhaltung von Formationen durch relative Positionsbestimmungen untersucht. Erste Tests wurden bereits erfolgreich in einem Schwimmbad und dem Ratzeburger See durchgeführt. Zur Planung und Überwachung von Messeinsätzen wird außerdem eine grafische Oberfläche entwickelt.

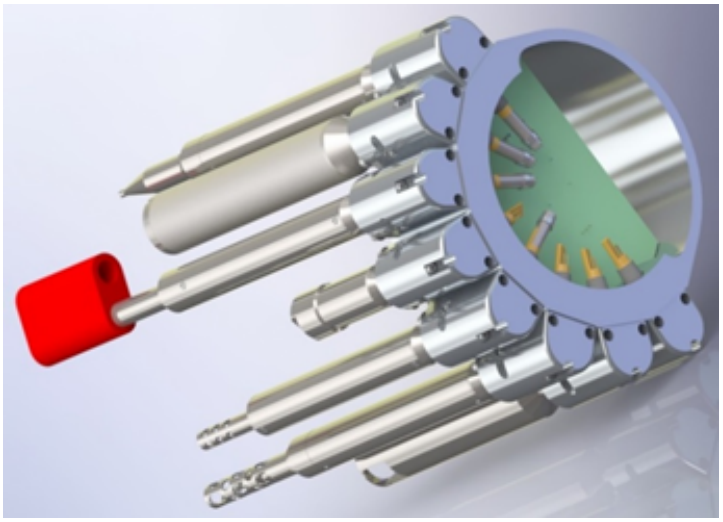

Abbildung 3: 3D-Model des neukonzipierten Sondenträgers für den Einsatz als Mittelstück in MONSUN (vgl. Abb. 2). Über Steckaufnahmen können bis zu acht einsatzspezifische Sensoren durch den Anwender angeschlossen werden.

3.2 Sensorik und Integration

Zur Realisierung des modularen Sensorkonzepts konstruiert die Firma Sea & Sun Technologies eine bestehende Sensorsonde (Sea & Sun Technology GmbH o.D.) um. Im ersten Schritt wurde ein Sondenträger mit Plug&Play-Konzept entwickelt, der strömungsoptimiert in die Außenhülle von MONSUN eingelassen und mit zusätzlichen Druckschotts versehen ist. Ein Modell des Sondenträgers ist in Abb. 3 dargestellt. Die neu entwickelte Sensoreinheit verfügt ferner über eine interne Digitalisierung, um Störungen durch die Steuereinheit und die Motoren auszuschließen. Sie liefert ferner bereits verrechnete Größen wie Schallgeschwindigkeit zur Unterwasserselbstlokalisation. Schließlich wird auch ein neuer, miniaturisierter Spezialsensor zur Detektion verschiedener Öle entwickelt.

3.3 Akustische Unterwasserkommunikation

Bei der Messdatenerhebung ist eine Korrelation der Werte mit Positionsdaten unerlässlich. Gleichzeitig müssen die Daten zeitnah und bereits während des Tauchvorgangs zwischen mehreren MONSUN AUVs ausgetauscht (z. B. zur gemeinsamen Identifikation einer Schadstoffquelle) und an eine Kontrollstelle übertragen werden.

Aufgrund der in Abschnitt 2.3 ausgeführten Gründe wird hierzu das von der Arbeitsgruppe smartPORT der Technischen Universität Hamburg selbstentwickelte Akustikmodem verwen-

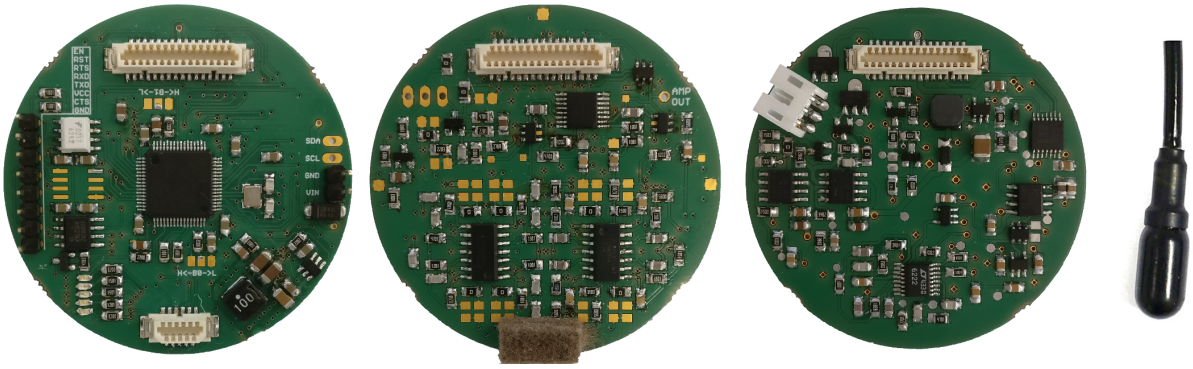

Abbildung 4: Komponenten des smartPORT Akustikmodems (v.l.n.r.): Mainboard mit Cortex M4 Micro-Controller, analoger Verstärker und Bandpassfilter, Leistungsverstärker, Hydrophon (Aquarian Audio AS-1).

det (Renner, Gabrecht et al. 2016; Renner und Golkowski 2016). Dieses hat eine Reichweite von ca. $100\,\mathrm{m}$ bei einer Datenrate von bis zu 1 kbps. Mit Materialkosten von unter €600 (für Kleinstserien von 10 Exemplaren) und einer Größe von nur $\varnothing 52\,\mathrm{mm} \times 30\,\mathrm{mm}$ erfüllt es die Anforderungen an den Einbau in MONSUN und geringe Systemkosten. Mit einer Leistungsaufnahme von nur $300\,\mathrm{mW}$ im Empfangsmodus und wenigen Milliwatt im Ruhemodus wird die Laufzeit des AUVs kaum beeinträchtigt. Durch das miniaturisierte Hydrophon der Serie AS-1 von Aquarian Audio Aquarian Audio Products o.D. ist eine einfache Reproduktion gewährleistet und der Einbau in MONSUN problemlos möglich.

Im Rahmen des MoSAIk-Projekts werden leichtgewichtige Lokalisationsalgorithmen erforscht. In diesem Kontext ist insbesondere eine Minimierung der Rechenkomplexität und Speichernutzung von hoher Priorität, da sowohl das Modem als auch MONSUN nur über vergleichsweise geringe Ressourcen (i. Vgl. zu performanten Desktop oder gar Hochleistungsrechnern) verfügen und eine echtzeitfähige Berechnung erforderlich ist. Die zur Lokalisation notwendige Messung von Distanzen zwischen AUVs wurde bereits untersucht und in (Renner 2017) vorgestellt.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND NÄCHSTE SCHRITTE

Im Rahmen des BMBF-geförderten MoSAIk-Projekts wird ein System bestehend aus kleinen, wendigen und kostengünstigen Unterwasserfahrzeugen und aufgabenspezifischer Sensorik konzeptioniert und erforscht. Grundlagen des Projekts sind der autonome Tauchroboter MONSUN der Universität zu Lübeck, das miniaturisierte Akustikmodem zur Unterwasserkommunikation der Technischen Universität Hamburg sowie die Präzisionssensorik der Firma

Sea&Sun Technology. Anwendungsseitig wird das Projekt durch die Behörde für Umwelt und Energie der Stadt Hamburg begleitet.

Im bisherigen Projektverlauf wurden erste Ergebnisse im Bereich der Unterwasserselbstlokalisation, Schwarmformation und Missionsplanung erzielt. Das Konzept für eine modulare Sensoreinheit wurde entwickelt. Im weiteren Verlauf des Projekts werden die Sensoren und das Akustikmodem in MONSUN integriert. Eine praktische Erprobung eines Funktionsdemonstrators des geplanten Gesamtsystems wird den Abschluss bilden.

ACKNOWLEDGEMENTS

Das MoSAIk-Projekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter Förderkennzeichen 13N14153 gefördert.

LITERATUR

Aquarian Audio Products (o.D.). *Aquarian Hydrophones*. `http://www.aquarianaudio.com`. Letzter Zugriff: 2017/07/23.

Cario, Gianni, Alessandro Casavola, Marco Lupia und Claudio Rosace (2015). "SeaModem: A Low-Cost Underwater Acoustic Modem for Shallow Water Communication". In: *Proeedings of the IEEE/MTS OCEANS Conference*. Genova, Italy.

Evologics GmbH (o.D.). *Underwater Acoustic Modems*. `http://www.evologics.de/en/products/acoustics/`. Letzter Zugriff: 2017/07/23.

Gallimore, E., J. Partan, I. Vaughn, S. Singh, J. Shusta und L. Freitag (2010). "The WHOI Micromodem-2: A Scalable System for Acoustic Communications and Networking". In: *OCEANS*. Seattle, WA, USA.

Geist, A. R., A. Hackbarth, E. Kreuzer, V. Rausch, M. Sankur und E. Solowjow (2016). "Towards a Hyperbolic Acoustic One-Way Localization System for Underwater Swarm Robotics". In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Stockholm, Sweden.

Hackbarth, A., E. Kreuzer und E. Solowjow (2015). "HippoCampus: A Micro Underwater Vehicle for Swarm Applications". In: *Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Hamburg, Germany.

Hydromea (2015). *Vertex AUV System Overview*. `http://hydromea.com/vertex_brochure.pdf`. Letzter Zugriff: 2017/07/23.

Meyer, Benjamin, Kristian Ehlers, Cedric Isokeit und Erik Maehle (2014). "The Development of the Modular Hard- and Software Architecture of the Autonomous Underwater Vehicle MONSUN". In: *Proceedings of the 45th International Symposium on Robotics (ISR 2014) and the 8th German Conference on Robotics (ROBOTIK 2014)*. Munich, Germany.

Meyer, Benjamin, Christian Renner und Erik Maehle (2016). "Versatile Sensor and Communication Expansion Set for the Autonomous Underwater Vehicle MONSUN". In: *Proceedings of the 19th International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR)*. London, UK.

Renner, Christian (2017). *Packet-Based Ranging with a Low-Power, Low-Cost Acoustic Modem for Micro AUVs*. Hamburg, Germany.

Renner, Christian, Alexander Gabrecht, Benjamin Meyer, Christoph Osterloh und Erik Maehle (2016). "Low-Power Low-Cost Acoustic Underwater Modem". In: *Quantitative Monitoring of the Underwater Environment: Results of the International Marine Science and Technology Event MOQESM'14 in Brest, France, ser. Ocean Engineering & Oceanography*.

Renner, Christian und Alexander J. Golkowski (2016). "Acoustic Modem for Micro AUVs: Design and Practical Evaluation". In: *Proceedings of the 11th ACM International Conference on Underwater Networks & Systems (WUWNet)*. Shanghai, China.

Riptide Autonomous Solutions (o.D.). *Micro-UUV*. `https://riptideas.com/micro-uuv/`. Letzter Zugriff: 2017/07/23.

Sanchez, A., S. Blanc, P. Yuste, A. Perles und J. J. Serrano (2012). "An Ultra-Low Power and Flexible Acoustic Modem Design to Develop Energy-Efficient Underwater Sensor Networks". In: *Sensors, SI on Underwater Sensor Nodes and Underwater Sensor Networks* 12.6, S. 6837–6856.

Sea & Sun Technology GmbH (o.D.). `http://www.sea-sun-tech.com/en/marine-tech/oceanography/ctd-multi-parameter-sonden/ctd-48c-multiparameter-probe.html`. Letzter Zugriff: 2017/07/23.

Sonardyne (o.D.). *Underwater Acoustic Modem Micro*. `https://www.sonardyne.com/product/underwater-acoustic-modems/`. Letzter Zugriff: 2017/07/23.

Teledyne Benthos (o.D.). *ATM-903 series*. `http://teledynebenthos.com/product/acoustic_modems/903-series-atm-903`. Letzter Zugriff: 2017/07/23.

Tritech International Limited (o.D.). *Micron Data Modem – Acoustic Modem*. `http://www.tritech.co.uk/product/micron-data-modem`. Letzter Zugriff: 2017/07/23.

University, The Australian National (o.D.). *Serafina project homepage*. `http://serafina.anu.edu.au/`. Letzter Zugriff: 2017/07/23.