

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Schneider, Vincent; Zantopp, Nico; Oeffner, Johannes
RoboVaaS. Praxisorientierte Entwicklung von robotischen Systemen mit As-a-Service-Ansatz für den Hafen der Zukunft

Hydrographische Nachrichten

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108638>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Schneider, Vincent; Zantopp, Nico; Oeffner, Johannes (2022): RoboVaaS. Praxisorientierte Entwicklung von robotischen Systemen mit As-a-Service-Ansatz für den Hafen der Zukunft. In: Hydrographische Nachrichten 121. Rostock: Deutsche Hydrographische Gesellschaft e.V.. S. 14-20. <https://doi.org/10.23784/HN121-03>.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



RoboVaaS

Praxisorientierte Entwicklung von robotischen Systemen mit As-a-Service-Ansatz für den Hafen der Zukunft

Ein Beitrag von VINCENT SCHNEIDER, NICO ZANTOPP und JOHANNES OEFFNER

Digitalisierung und Vernetzung von Hafeninfrastruktur ist ein voranschreitender Trend, der eng verzahnt ist mit dem Einsatz von Autonomous Surface Vehicles (ASV). Zur Betrachtung des As-a-Service-Konzeptes unter Anwendung von maritimen Robotern im Hafenumfeld wurden im Rahmen des RoboVaaS-Projektes fünf Services entwickelt, implementiert, getestet und demonstriert. Die Services sind: Echtzeit-Strandungsvermeidungsdienst, Schiffsrumpfinspektion, Kaimauerinspektion, Hydrographische Tiefenmessungen, Data Muling – eine asynchrone akustische Mittelstrecken-Kommunikationstechnologie. Um die gesamte Servicearchitektur abzubilden, wurde eine Software-Infrastruktur geschaffen, die die gesamte Service-Pipeline von der Erstellung eines Auftrages über die Durchführung bis hin zum Sichten der Ergebnisse abbildet. Im Mittelpunkt der Hardware-Entwicklungen stehen ASV und Remotely Operated Vehicles (ROV), mit denen die Services hardwareseitig implementiert und demonstriert wurden. Das Projekt wurde live auf dem ITS World Congress in Hamburg 2021 vorgestellt. Folgeprojekte nutzen die Entwicklungsarbeiten und bauen auf der Servicearchitektur der Software und dem ASV SeaML:SeaLion auf und binden zusätzlich Flugdrohnen ein, um automatisierte Müllbeseitigung aus dem Meer und Inspektion von Hafeninfrastruktur zu entwickeln.

ASV | ROV | WebUI | Schiffsrumpfinspektion | Kaimauerinspektion | Tiefenvermessung | RoboVaaS
ASV | ROV | WebUI | hull inspection | quay wall inspection | depth sounding | RoboVaaS

Digitalisation and networking of port infrastructure is an advancing trend that is closely intertwined with the use of autonomous surface vehicles (ASV). To examine the as-a-service concept using maritime robots in the port environment, five services were developed, implemented, tested and demonstrated as part of the RoboVaaS project. The services are: real-time beaching avoidance service, hull inspection, quay wall inspection, hydrographic depth survey, data muling – an asynchronous acoustic medium range communication technology. In order to map the entire service architecture, a software infrastructure was created that maps the entire service pipeline from the creation of an order to its execution and the viewing of the results. The hardware developments focus on ASVs and remotely operated vehicles (ROV), which were used to implement and demonstrate the services on the hardware side. The project was presented live at the ITS World Congress in Hamburg 2021. Follow-up projects will use the development work and build on the service architecture of the software and the ASV SeaML:SeaLion and additionally integrate aerial drones to develop automated waste removal from the sea and inspection of port infrastructure.

Autoren

Vincent Schneider, Nico Zantopp und Johannes Oeffner sind wissenschaftliche Mitarbeiter beim Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen CML in Hamburg.

vincent.schneider@cml.fraunhofer.de

Einleitung

Die Digitalisierung, Vernetzung und Miniaturisierung von kleinen unbenannten Wasserfahrzeugen ist ein aktuell voranschreitender Trend (Burmeister et al. 2021). Autonome Schiffe werden entweder als Autonomous Surface Vehicles (ASV) oder Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) bezeichnet. Diese sind dabei sehr vielfältig in ihrer Erscheinungsform sowie Anwendungsbereichen (Tanakitkorn 2018). Mit ihren sich immer weiterentwickelnden technischen Fähigkeiten kombiniert mit entsprechenden neuen Rechtsvorschriften sowie Fortschritten in der Drohnentechnologie im nicht-maritimen Bereich werden die Möglich-

keiten auf ein neues Niveau gehoben. Hier setzte das Projekt RoboVaaS (Robotic Vessels as a Service) an, welches fünf Services mit dem Fokus der Erforschung von anwendungsnahen Servicekonzepten für den Hafen der Zukunft entwickelt und implementiert hat. Einer der Services beleuchtet hydrographische Tiefenvermessungen mittels ASV – ein fest etabliertes Aufgabengebiet dieser Fahrzeugklasse. Dies wird deutlich an den Aktivitäten des Projektpartners und potenziellen Interessenvertreters für automatisierte Hafenservices HPA (Hamburg Port Authority). Die Hydrographie-Abteilung der HPA wird seit einiger Zeit von der ECHO.1 – einem 1,6 m langem ASV mit Jetantrieb

(Typ SL40 von Oceanalpha) – bei der regelmäßigen Vermessung des Hamburger Hafens unterstützt (hamburg.de 2020).

Ein direkter Vergleich mit den konventionellen Peilschiffen der HPA zeigt die Stärken von ASV für solche und weitere Anwendungen. Die Peilschiffe der HPA sind die *Deepenschriewer I bis IV*, welche mit modernen Fächerecholoten (MBES) und mit GNSS sowie Trägheitssystemen zur Navigation ausgestattet sind (Köster und Thies 2015). Sie variieren in der Länge zwischen 12 m und 29 m und in der Breite zwischen 4 m und 9 m. Im Vergleich ist die ECHO.1 ebenfalls mit einem MBES und mit GNSS zur Positionsbestimmung ausgestattet, sie weist aber nur eine Länge von 1,6 m auf bei einem Tiefgang von 0,15 m. Weitere Vorteile des kleineren Systems sind z. B. die Reduzierung des notwendigen Personals, geringere Betriebskosten sowie Flexibilität. Besonders in einem Hafen mit Tideeffekten wie Hamburg können kleine Fahrzeuge mit geringem Tiefgang länger zur Vermessung eingesetzt werden und Bereiche bei Niedrigwasser erreichen, die für klassische Schiffe nicht zugänglich sind.

Im Projekt RoboVaaS wurde die Notwendigkeit einer breiten Vernetzung maritimer Robotikkonzepte zu ganzheitlichen Services thematisiert. Hierbei standen fünf im Projekt erarbeitete Servicekonzepte im Mittelpunkt, um eine Kombination geeigneter Softwarearchitektur und Hardware-Infrastruktur zu schaffen. Das Ziel war neben der Erforschung und Entwicklung der technischen Einzellösungen das Erschaffen eines flexiblen Dienstleistungssystems, was einer Vielzahl von Akteuren im Hafen der Zukunft zur Verfügung gestellt werden kann. Dieser holistische Ansatz robotischer Fahrzeuge integriert in eine Servicearchitektur und nicht als Insellösungen bietet das Potenzial, dass Roboterschiffe ein wertvolles Mittel werden können, um eine durchdringende Digitalisierung der Häfen der Zukunft zu erreichen.

Das RoboVaaS-Konzept

Um das ganzheitliche Konzept der Häfen der Zukunft greifbar zu machen und in einem Projekt zu bearbeiten, wurden mittels enger Zusammenarbeit von möglichen Interessenvertretern wie der Hamburg Port Authority (HPA) sowie Industrie- und Wissenschaftspartnern innerhalb des Konsortiums fünf Dienstleistungen definiert, entwickelt, getestet und einem Fachpublikum vorgestellt und demonstriert (Schneider et al. 2020a). Diese fünf RoboVaaS-Services sind (Abb. 1):

- Echtzeit-Strandungsvermeidungsdienst,
- Schiffsrumpfinspektion mittels ROV und ASV,
- Kaimauerinspektion mittels ROV und ASV,
- hydrographische Tiefenmessungen,
- Data Muling – eine akustische Mittelstrecken-Kommunikationstechnologie die unter Wasser zum Einsatz kommt.

Der Echtzeit-Strandungsvermeidungsdienst thematisiert eines der größten Risiken für die Sicherheit im Seeverkehr – Grundberührungen von Schiffen. 20 % der Gesamtverluste von Schiffen in den letzten zehn Jahren sind auf Grundberührungen

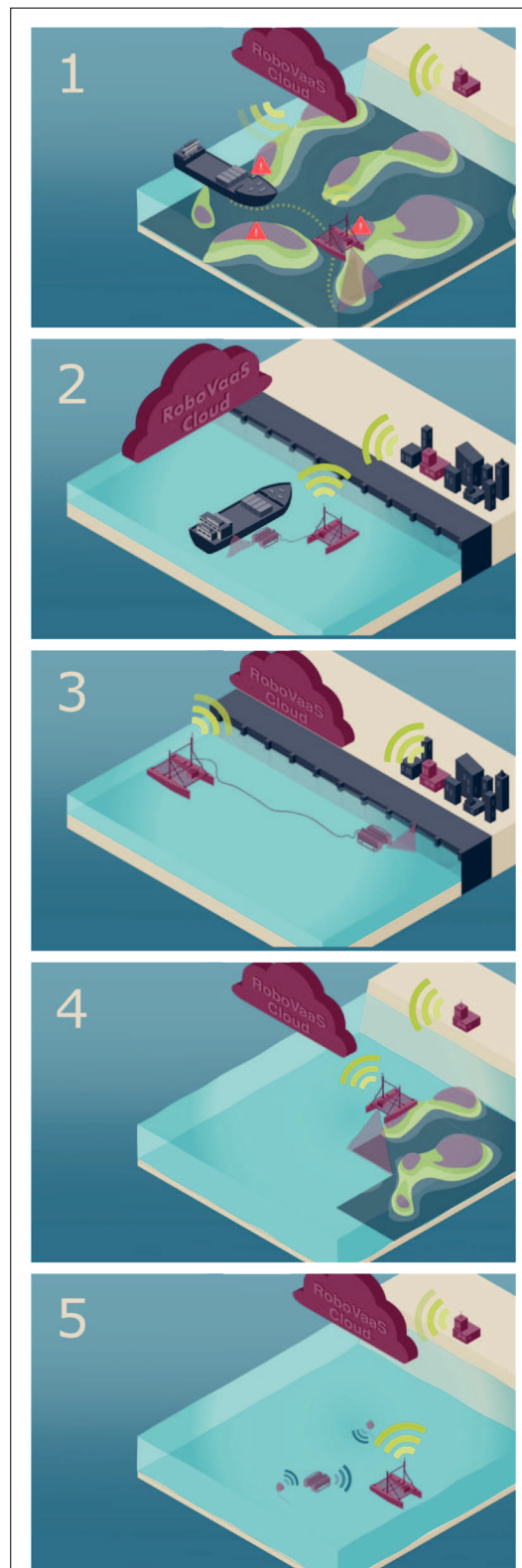


Abb. 1: Die fünf in RoboVaaS untersuchten Services:

- 1:** Strandungsvermeidungsdienst, **2:** Schiffsrumpfinspektion, **3:** Kaimauerinspektion, **4:** hydrographische Tiefenmessung, **5:** Data Muling

gen zurückzuführen (AGCS 2019). Hafengebiete und Hafenzufahrten sind Gebiete mit besonders hohem Risiko für Grundberührungen, da die Wassertiefe limitiert ist und es wenig Raum für Korrekturmanöver gibt. In Hafengebieten mit großem Tidenhub sind Sedimentablagerungen zu berücksichtigen, die regelmäßige und ressourcenintensive Tiefenvermessungen notwendig machen.

In vielbefahrenen Gewässern von Industrienationen ist die regelmäßige Kartierung gewährleistet, in Gebieten mit veralteten Seekarten jedoch entstehen in Verbindung mit Navigationsfehlern und Fehlern durch Lotsen Grundberührungen. Der RoboVaaS-Service wird hier in Form von Echtzeit-Tiefenmessungen in Flachwasser bereitgestellt, welche durch ein vorausfahrendes ASV mit einem zeitlichen Versatz von ca. 20 Minuten durchgeführt werden (Schneider et al. 2020b). Die Tiefendaten werden über die RoboVaaS-Cloud direkt an das Schiff gesendet und dort dem ECDIS (Electronic Chart Display and Information System) überlagert und stellen so zusätzliche Informationen in einer bekannten Mensch-Maschine-Schnittstelle dar. Diese erhöht die potenzielle Akzeptanz so eines Services und wurde in der Praxis mit Nautikern getestet (Schneider et al. 2020b).

Schiffsrumpfspektionen bilden einen großen Dienstleistungssektor im Hafen- und Küstenumfeld. Hierbei reicht das Spektrum von Reinigungsarbeiten von Biofouling an der gesamten Hülle oder Einzelkomponenten wie Schiffsschraube oder Seekästen hin zu Inspektionen auf mögliche Schäden, wie durch eine mögliche Grundberührung. Diese Arbeiten werden in der Regel von Tauchern durchgeführt und sind oft durch schlechte Sichtverhältnisse in Hafengewässern geprägt. Eine exakte Ermittlung von Schäden, wie Größe und Tiefe einer Eindellung, sind nicht quantitativ zu ermitteln. Hier setzt der entwickelte Service mittels eines speziell entwickelten RGB-Lasersystems an. Dieses vom Projektpartner, der Kraken Robotik GmbH, entwickelte System SeaVision kann mit Sub-Zentimeter-Auflösung die Rumpfgeometrie vermessen und die Daten mittels Odometrie exakt am Rumpf referenzieren (Niemeyer et al. 2019). Der Service besteht dabei aus einem ASV, das als Trägerplattform fungiert, und einem ROV – ausgestattet mit besagtem Lasersystem. Am Schiff angekommen, wird das ROV mit einem LARS (Launch and Recovery System) zu Wasser gelassen und kann die Inspektion durchführen. Die Daten werden mittels Glasfaserleitung zum ASV weitergeleitet, dort vorverarbeitet und dann über das Kommunikationsnetz an die Landstation übertragen. Auf diese Weise werden die Vorteile der exakten Laservermessung, des ROV als unter Wasser agierendes Fahrzeug und des ASV zur Überwindung größerer Strecken im Hafenumfeld in einem Service kombiniert.

Als Schwesterservice der Schiffsrumpfspektion

schließt sich die Kaimauerinspektion an, welche die gleiche Hardware verwendet, sich jedoch in der Zielgruppe der Anwender unterscheidet. Hierbei wurde ein Service entwickelt, der besonders für Hafenbetreiber von Interesse ist, die oft dutzende Kilometer von Kaimauern verwalten und instandhalten müssen. Die Sensoreinheiten können hierbei variieren – von oben beschriebenen Lasersystemen über optische Kameras bis hin zu bildgebenden Sonaren, welche bei sehr geringen Sichtverhältnissen zum Einsatz kommen können. Soll eine Kaimauer inspiziert werden, kann das ASV diese zeiteffizient erreichen und mittels LARS das ROV zu Wasser lassen. In einem Rasterverfahren wird die Kaimauer im Anschluss abgefahren, wobei ASV und ROV zusammenspielen und sich das ASV mit dem ROV mitbewegen kann, um ein effizientes Kabelmanagement zu gewährleisten. Die Daten werden ebenfalls an Bord vorverarbeitet, um die Datenrate möglichst gering zu halten, und dann an die Landstation geschickt.

Ein schon gut etablierter, aber nicht zu vernachlässigender Service sind autonome hydrographische Tiefenmessungen, die besonders relevant in Häfen mit starkem Tideeinfluss sind. Diese kommen mit einem vereinfachten Setup aus, wobei das ROV und LARS nicht integriert sind. Stattdessen ist ein Sonar, idealerweise ein Fächer-sonar, integriert, welches zur Rasterabtastung des Hafengebietes genutzt werden kann. Der Vorteil des ASV ist hier der geringere Mindestabstand zu Kaimauern und das Vermessen von Gebieten mit sehr geringem Tiefgang. Die bauformbedingte geringere Maximalgeschwindigkeit des kleinen ASV im Vergleich zu größeren Peilschiffen ist hier nicht von Bedeutung, da die Scangeschwindigkeit des verwendeten Fächer-sonars ausschlaggebend ist und diese typischerweise unter der der maximalen Geschwindigkeit des verwendeten ASV liegt (Ernstsen 2006).

Der innovativste Service innerhalb von RoboVaaS ist das Data Muling. Dieser wurde entwickelt, um die Grundlage dafür zu schaffen, das RoboVaaS-Netzwerk in Zukunft mit Autonomen Unterwasserfahrzeugen (AUVs) zu erweitern. Im Speziellen wurde ein Konzept für akustische Unterwasserkommunikation entwickelt, welche es überhaupt ermöglicht, unter Wasser Informationen über mittlere Distanzen – z.B. vom AUV ans ASV – zu übertragen. Das Konzept des Data Muling ist dabei bedingt durch die im Hafenumfeld begrenzte Reichweite. Anstatt die Informationen von einem Unterwassersensor bis zur Landstation zu senden, werden die Daten lokal gespeichert und der Kommunikationsknoten wartet darauf, dass sich ein mobiler Knoten in Reichweite begibt. Dieser mobile Knoten kann als passive Payload am ASV angebracht werden – so z.B. in Kombination mit den hydrographischen Tiefenmessungen. Nähert sich das ASV einem Unterwasserknoten, beginnt

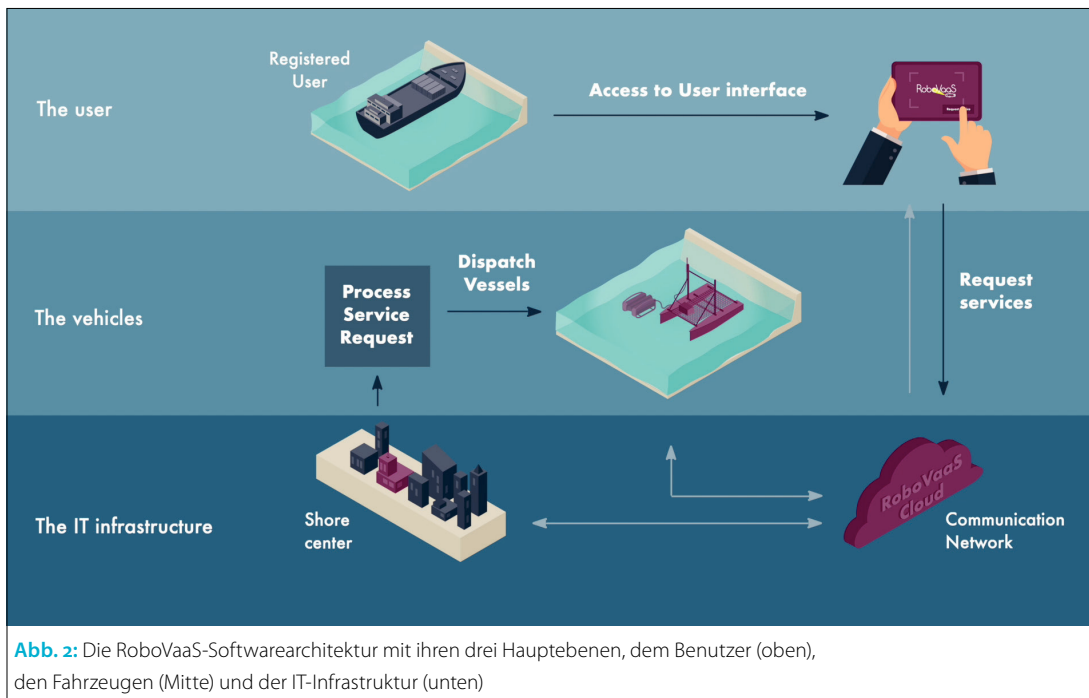


Abb. 2: Die RoboVaaS-Softwarearchitektur mit ihren drei Hauptebenen, dem Benutzer (oben), den Fahrzeugen (Mitte) und der IT-Infrastruktur (unten)

der Informationsaustausch von Knoten zu ASV. Das ASV funktioniert dabei als »mule« (Esel), das die Informationen weitertragen kann. Dabei können die Informationen entweder zu einem weiter entfernten Unterwasserknoten transportiert werden, oder direkt über das Überwasserkommunikationsnetzwerk zur Landstation gesendet werden. Diese multidirektionale Kommunikation mit einem asynchronen Transportmedium (dem Data mule) sowie die akustische Datenübertragung im flachen Hafengewässer (störende Geräusche sowie Reflexionen an Boden und Wasseroberfläche) birgt viele zu lösende Herausforderungen, die innerhalb des Projektes bearbeitet wurden (Signori et al. 2019).

Die Softwarearchitektur

Um die fünf Services nicht nur nebeneinander zu entwickeln, sondern sie auch in ein kohärentes Kontroll- und Benutzernetzwerk zu integrieren, wurde eine komplexe Softwarearchitektur entwickelt. Diese ermöglicht sowohl den Betreibern als auch den Nutzern (Kunden) des Systems einen einfachen und übersichtlichen Zugang und gewährleistet gleichzeitig den sicheren Informationsfluss zwischen allen integrierten Roboterfahrzeugen. Die Softwarearchitektur besteht aus einem Frontend (Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Eingabe und Auswertung von Ergebnissen), einem Backend (Umwandlung und Zuweisung des Nutzerinputs in Aufträge für robotischen Systeme sowie Überwachung und Steuerung der Kommunikation aller Komponenten) und einer Datenbank (Speicherung der Informationen zu registrierten Nutzern, allen Jobs sowie den Ergebnissen der Untersuchungen). Der detaillierte Aufbau der Softwarearchitektur ist im Detail in Delea et al. (2020) erläutert.

Die Softwarearchitektur kann vereinfacht wie in [Abb. 2](#) dargestellt werden mit den drei funktionalen Ebenen der »User« (Benutzer), der »Vehicles« (Fahrzeuge) und der »IT infrastructure« (IT-Infrastruktur). Will ein Nutzer einen Service buchen, muss dieser registriert sein und bekommt so Zugang zum RoboVaaS interface, WebUI genannt. Hier kann der gewünschte Service angelegt und ausgelöst werden, so kann z. B. für eine Tiefenvermessung das Gebiet auf einer Karte per gesetzten Eckpunkten des Untersuchungsgebietes definiert werden. Zufrieden mit der Auswahl des zu untersuchenden Gebietes, schickt der Nutzer den Auftrag ab, und dieser geht über die RoboVaaS-Cloud an die Landstation. Hier sitzt der RoboVaaS-Server, der den Auftrag registriert und einen Operator informiert. Dieser fungiert als Sicherheitsebene zwischen den Fahrzeugen und den Nutzern und teilt den Auftrag einem Fahrzeug zu. So kann der Nutzer nicht durch Unwissen einen fehlerhaften Befehl senden. Ist der Auftrag durch den Operator freigegeben, führt ein ASV mit der korrekten Konfiguration den Auftrag autonom aus und liefert die Ergebnisse in Echtzeit an das WebUI, wo der Auftraggeber den Status und die Ergebnisse einsehen kann.

Die ASV SeaML und SeaLion

Neben der RoboVaaS-Softwarearchitektur ist ein wiederkehrendes Element aller Services ein ASV in verschiedenen Konfigurationen. Um innerhalb des Projektes der konzeptionellen Ebene die praktische Demonstration gegenüberzustellen, wurde ein ASV entsprechend umgerüstet, sodass alle Funktionalitäten, notwendig zur Ausführung der Services, im Kern dargestellt und demonstriert werden können. Das entsprechende Fahrzeug ist

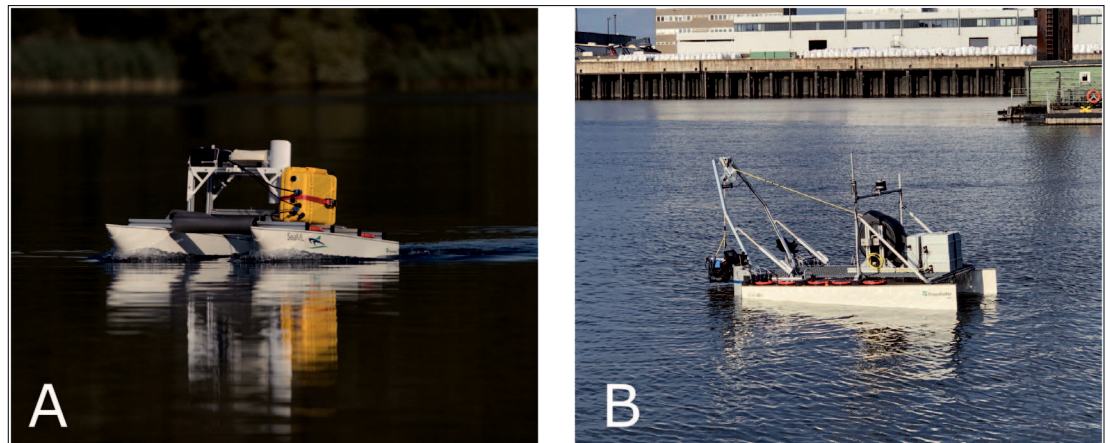


Abb. 3: Die vom CML entwickelten ASV, welche im Projekt RoboVaaS zum Einsatz kamen. **A:** *SeaML* mit seinem starren LARS zum Einholen des ROV. Gut zu erkennen das auf Deck montierte gelbe Kontroll-Kompartiment. **B:** *SeaLion* mit LARS bestehend aus Winde und ausschwenkbarem A-Frame. Alle Hauptbestandteile sind in den Rümpfen in Kompartments verbaut (schwarze Deckel mit rotem Rand). Auf Deck ist nur das Navigations-Kompartiment und die Windensteuerung verbaut

ein Katamaran namens *SeaML* (Schneider und Oeffner 2020). Im Laufe des Projektes wurde deutlich, dass die Qualität der RoboVaaS-Softwarearchitektur und deren TRL sich schneller entwickeln als das innerhalb des Projektes modernisierte ASV *SeaML*. Im Rahmen des CML-internen Förderprogramms SmartOcean konnten Forschungsmittel zur Entwicklung eines neuen, größeren und versatileren ASV namens *SeaML:SeaLion* (kurz *SeaLion*) akquiriert werden. Dies ermöglichte es in einer sehr kurzen Zeit von nur zehn Monaten, ein ASV mit Kapazitäten zu entwickeln, die den Anforderungen der RoboVaaS-Services gerecht wurden. [Abb. 3](#) und [Tabelle 1](#) zeigen einen Vergleich der beiden Fahrzeuge sowie die Verbesserung wesentlicher Komponenten und Fahrzeugeigenschaften.

Aufgrund der zeitweisen parallelen Entwicklung der beiden ASV *SeaML* und *SeaLion* wurden mit beiden Fahrzeugen wesentliche Meilensteine im Projekt RoboVaaS abgeschlossen. Als wichtigster Meilenstein, der mit *SeaML* erreicht wurde,

sei hier das Testen der gesamten RoboVaaS-Software-Pipeline in einer zweiwöchigen Testkampagne erwähnt. Die wichtigste Testkampagne mit *SeaLion* war die Woche vor und während des ITS World Congress, währenddessen auch die finale Demonstration des RoboVaaS-Projektes stattfand. Das Gesamtsystem wurde in einer einstündigen Liveübertragung der Öffentlichkeit präsentiert (Schneider et al. 2021).

Die zwei Testgebiete ([Abb. 4](#)) sind von sehr unterschiedlicher Natur, in denen verschiedene Fragestellungen bearbeitet und Systeme validiert wurden. In Hemmoor konnte aufgrund der offenen Wasserfläche und fehlender uferseitiger Bebauung ohne Störeinflüsse die maximale Reichweite und Datenübertragungsrate getestet werden. Ebenfalls konnte durch die hervorragende Sicht in dem See (bis zu 25 m) die Unterwasserinspektion per Video validiert werden. In dieser Testumgebung wurden die Services Schiff- und Kaimauerinspektion, hydrographische Tiefenmessung und Data Muling getestet. Hierbei wurde der

Name	<i>SeaML 1.0</i>	<i>SeaML:SeaLion</i>
Bootstyp	ASV (1210 mm × 1500 mm) (Katamaran)	ASV (2200 mm × 1500 mm) (Katamaran)
Payload	50 kg	120 kg
Akkulaufzeit	maximal 6 h	maximal 24 h
Höchstgeschwindigkeit	3 Knoten	8 Knoten
Anzahl der Motoren	4 Motoren für Vorausrfahrt	2 Motoren für Vorausrfahrt
Motortyp	Elektromotoren	Elektromotoren
Leistung der Motoren	4 × 350 W	2 × 1 kW
Material des Bootes	GFK	GFK
Fahrtgebiet	Binnengewässer	Binnengewässer und Küstengebiete
Sensoren für die Umgebungswahrnehmung	Kamera	LiDAR, Stereokamera, Radar, AIS
Hersteller	Fraunhofer CML – Eigenbau	Fraunhofer CML – Eigenbau

Tabelle 1: Eigenschaften der ASV *SeaML* und *SeaLion*, vom CML entwickelt und in RoboVaaS eingesetzt



Abb. 4: Testgebiete für Systemtests. **Links:** Hemmoor mit natürlich bewachsenen Ufern und ohne metallische Strukturen. Zu sehen sind die Basisstation (Zelt oben rechts) und Anleger und *SeaML* (unten links). **Rechts:** HomePORT-Gelände der HPA mit Anleger. Beiboot für Tests (unten links) und Kaimauer sowie Hafeninfrastruktur sind zu erkennen. Vielzahl von metallischen Strukturen in direkter Wassernähe

Schwerpunkt auf die vollständige Integration der Service-Pipeline gelegt. Vor Ort wurde ein mobiler RoboVaaS-Server mit Datenbank sowie Front- und Backend eingerichtet. Für jedes Experiment wurde mit einem fiktiven Kunden ein Job für den jeweiligen Service angelegt und die Daten anschließend in der RoboVaaS-Datenbank gespeichert. Insgesamt wurden 27 erfolgreiche Testläufe durchgeführt mit den folgenden Ergebnissen:

- drei Kaimauerinspektionen mit 50 Minuten Videomaterial,
- acht hydrographische Tiefenmessungen mit 17 000 validen Datenpunkten,
- 16 Data-Muling-Durchläufe mit erfolgreichen Datenübertragungen.

Die Validierung der RoboVaaS-Softwarearchitektur und Service-Pipeline wurde damit erfolgreich abgeschlossen.

Die Testumgebung am HomePORT-Testgelände der HPA sowie die Art der Tests unterscheiden sich deutlich zu den Versuchen in Hemmoor. Mit der finalen Demonstration als Ziel dieser Tests und der validierten Servicearchitektur lag das Hauptaugenmerk auf der Validierung des ASV *SeaLion* und seinen Fähigkeiten. In einer zweiwöchigen Test- und Demonstrationsphase wurden die Systeme Navigation, Autopilot, LARS und ROV-Kommunikation final getestet und erprobt. Eine Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisse ist [Tabelle 2](#) zu entnehmen.

Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb des RoboVaaS-Projektes wurde eine Serviceinfrastruktur für fünf hafennahe Services konzipiert, entwickelt und validiert. Hierbei lag der Fokus auf dem As-a-Service-Konzept unter Einbindung von robotischen Fahrzeugen auf und unter der Wasseroberfläche, um für Häfen Servicekonzepte zu beleuchten, die in Zukunft von zunehmender Bedeutung sein werden.

Die entwickelte Serviceinfrastruktur umfasst eine Software-Pipeline, mit der alle Funktionalitäten

vom Erstellen eines Auftrags, über die Durchführung durch robotische Fahrzeuge bis hin zur Auswertung und Präsentation der Ergebnisse für eine Vielzahl von Akteuren abgebildet werden können. Hierbei sind die Akteure Nutzer, Operator und Administrator vorgesehen, welchen – mit unterschiedlichen Rechten ausgestattet – unterschiedliche Rollen zugewiesen werden können. Alle Dienste sind über eine webbasierte Oberfläche zu erreichen und erlauben zusätzlich die Erstellung der Serviceaufträge sowie das Abrufen der Ergebnisse in Echtzeit. Durch eine Aufteilung der Logik in Frontend, Backend und WebUI ist das System skalierbar konzipiert, sodass weitere Services für die Häfen der Zukunft angelegt werden können und die Anzahl der Benutzer beliebig skaliert werden kann. So ist das System denkbar für den Einsatz im Hafenumfeld, in dem Hafenbetreiber und Schiffs-eigner als Nutzer Services buchen können.

Untermuert wird die entwickelte Softwarelösung durch eine modulare Hardware-Testplattform namens *SeaLion*, mit der vier der fünf Services demonstriert werden konnten. In zwei umfassenden Testkampagnen wurde die Serviceinfra-

Nr. Ergebnis

- | | |
|---|---|
| 1 | Untersuchung der Übertragungsqualität in einem Radius von 2 km des entwickelten 5-GHz-Kommunikationsnetzes für die Kommunikation zwischen der Landstation und dem ASV im Bereich HomePORT (Elbe Hamburg) |
| 2 | Evaluierung der Leistungsfähigkeit des Autopiloten unter dem Einfluss des Gezeitenstroms und Optimierung der Regelungsparameter zur Minimierung des Kursversatzes auf eine maximale Abweichung von 1 m |
| 3 | Optimierung der Leistung des Positionshaltemodus unter dem Einfluss von Störungen, wie z. B. Seegang durch andere Schiffe und Wind auf eine erlaubte Abweichung von 5 m |
| 4 | Erhöhung der Zuverlässigkeit des LARS (Launch and Recovery System) zum Absenken des ROV durch Anpassung der Software-Logik und Optimierung der Hardware |
| 5 | Nach Abschluss der Einzeltests und Optimierung der Performance des ASV wurde die gesamte entwickelte RoboVaaS-Pipeline (Bestellung eines Services und anschließende Durchführung eines Service) anhand der Spundwandinspektion im Bereich HomePORT (Elbe Hamburg) mit dem <i>SeaLion</i> als ausführendes ASV validiert |

Tabelle 2: Hauptergebnisse der zweiwöchigen Testkampagne in Hamburg

struktur zunächst validiert und anschließend auf dem ITS World Congress demonstriert. Die finale Demonstration auf der ITS konnte einem breiten Publikum von Messebesuchern vor Ort gezeigt werden und wurde zeitgleich auf die Messe und ins Internet übertragen (Schneider et al. 2021).

Die Projektziele der Implementierung einer skalierbaren Softwarearchitektur und einer modularen Hardware-Testplattform war eines der Hauptziele von RoboVaaS.

Diese Modularität von Soft- und Hardware führt zu Synergien und neuen Möglichkeiten, der fortlaufenden Verwertung. So können zum Beispiel zwei weitere Forschungsprojekte des CML mit ähnlichen Anforderungen auf die entwickelten Systeme aufbauen. So greifen die Horizon2020-Projekte SeaClear (Search, identification and collection of marine litter with autonomous robots) und RAPID (Risk-aware Autonomous Port Inspection Drones) die Entwicklungen auf und treiben wichtige Zukunftsthemen wie automatisierte Müllbeseitigung im Hafenumfeld (SeaClear 2022)

und Inspektion von kritischer Infrastruktur wie z. B. Brücken im Hafenkontext (RAPID 2017) voran. In beiden Projekten wurde das Roboternetzwerk zusätzlich mit Flugdrohnen erweitert. Das starke Medieninteresse, die zahlreichen Bewilligungen von nationalen und internationalen Fördergeldern für Kooperationsprojekte mit industrieller Beteiligung (z. B. Hafenbetreiber) aus dem Bereich der maritimen Assistenzrobotik zeigt die wirtschaftliche Relevanz von RoboVaaS und von ähnlichen Services zum Absolvieren spezifischer Aufgaben der Häfen der Zukunft. //

Funding

This project is funded by German Federal Ministry of Economic Affairs and Energy (BMWi), Italian Ministry of Education, Universities and Research (MIUR) and Irish Marine Institute (MI) and co-funded by European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the framework of ERA-NET Cofund MarTERA (Maritime and Marine Technologies for a new Era).

Literatur

- AGCS (2019): Safety and Shipping Review 2019. Allianz Global Corporate & Specialty SE, www.agcs.allianz.com/content/dam/onemarketing/agcs/agcs/reports/AGCS-Safety-Shipping-Review-2019.pdf
- Burmeister, Hans-Christoph; Vincent Schneider et al. (2021): RoboVaaS – Future port service by scalable robotic vessels. 27th ITS World Congress, Hamburg, 11-15 October 2021, <https://itsworldcongress.com/the-book-of-abstracts-download>
- Delea, Cosmin; Emanuele Coccolo et al. (2020): Communication Infrastructure and Cloud Computing in Robotic Vessel as-a-Service Application. Global Oceans 2020: Singapore – U.S. Gulf Coast, IEEE 2020, DOI: 10.1109/IEEECONF38699.2020.9389285
- Ernstsen, Verner B.; Riko Noormets et al. (2006): Quantification of dune dynamics during a tidal cycle in an inlet channel of the Danish Wadden Sea Geo-Marine Letters 2006, DOI: 10.1007/s00367-006-0026-2
- hamburg.de (2020): echo.1: HPA tauft Drohne zur Gewässervermessung. www.hamburg.de/bvm/weltkongress-2021/13725514/wasserdrohne
- Köster, Frank; Thomas Thies (2015): The evolution of the Port of Hamburg from a hydrographic perspective. Hydrographische Nachrichten, DOI: 10.23784/HN100_11
- Niemeyer, Frank; Tim Dolereit et al. (2019): Untersuchungen von optischen Scansystemen zur geometrischen Erfassung von Unterwasserstrukturen. Hydrographische Nachrichten, DOI: 10.23784/HN113-02
- RAPID (2017): Risk-aware Autonomous Port Inspection Drones. <https://rapid2020.eu>
- Schneider, Vincent; Cosmin Delea et al. (2020a): Robotic service concepts for the port of tomorrow: Developed via a small-scale demonstration. 2020 European Navigation Conference (ENC), DOI: 10.23919/ENC48637.2020.9317486
- Schneider, Vincent; Manfred Constapel et al. (2020b): Towards an investigation of a MASS-assisted anti-grounding service through simulated nautical scenarios in a ship handling simulator. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 929
- Schneider, Vincent; Johannes Oeffner (2020): Hardware for the port of the future. Hansa International Maritime Journal 2020, <https://hansa-online.de/2020/09/schiffstechnik/159739>
- Schneider, Vincent; Cosmin Delea et al. (2021): Final RoboVaaS Demonstration live at ITS World Congress: Recording of live demonstration. www.youtube.com/watch?v=HbJJCo_-dJQ
- SeaClear (2022): SEACLEAR – We are building the first robots to clean the litter from the ocean floor. <https://seaclear-project.eu>
- Signori, Alberto; Filippo Campagnaro et al. (2019): Data gathering from a multimodal dense underwater acoustic sensor network deployed in shallow fresh water scenarios. Journal of Sensor and Actuator Networks, DOI: 10.15480/882.2537
- Tanakitkorn, Kantapon (2018): A review of unmanned surface vehicle development. Maritime Technology and Research, DOI: 10.33175/mtr.2019.140730