

# Hochaufgelöste autonome Digitalisierung von Unterwasserstrukturen in Häfen und offshore

Ein Beitrag von HEDDA PRECHT und THOMAS VONACH

Robotics as a Service: Was in der industriellen Fertigung bereits gang und gäbe ist, ist im Bereich der Instandhaltung systemrelevanter Hafeninfrastruktur noch nicht weit verbreitet. Das soll sich ändern. Die österreichische subdrone GmbH hat sich auf die Entwicklung von Navigationsalgorithmen, die AUV-Navigation im objektrelativen Bereich und das Erheben und Auswerten von Inspektionsdaten spezialisiert. Die Idee: Ein AUV als anwendungsbezogenes Gesamtsystem. Dabei erlaubt es der Einsatz der proprietären Relativen Objekt-Navigation (RON), auf kostenintensive externe Positionierungslösungen zu verzichten. Aktuell wird die in den vergangenen Jahren gesammelte Missionskompetenz auch als projektbezogener Service angeboten. Der sich hieraus ergebende Vorteil für Hafenbehörden und Tauchunternehmen: Technik und Unterwasserrobotik-Kompetenz sind genau dann dort, wenn sie und wo sie benötigt werden, ohne dass eigene Technologien entwickelt werden müssen. Damit entfällt für die Auftraggeber auch die aufwendige Suche nach gut ausgebildeten Fachkräften, die kontinuierlich weitergebildet und im Unternehmen gehalten werden müssen. Als Teilaspekte des Serviceangebots sollen hier die 3D-Spundwandvermessung und die Schiffsrumpfspektion exemplarisch vorgestellt werden.

AUV | autonome Unterwasserinspektion | IWS | Punktwolke | Rumpfspektion | Schlosssprengung | Spundwandvermessung

AUV | autonomous underwater inspection | IWS | point cloud | hull inspection | declutching | sheet pile survey

Robotics as a Service: What is already commonplace in industrial manufacturing is not yet widespread in the area of maintenance of system-relevant port infrastructure. This is about to change. The Austrian company subdrone GmbH specialises in the development of navigation algorithms, AUV navigation in the object-related range and the collection and evaluation of inspection data. The idea: An AUV as an application-related overall system. The use of proprietary relative object navigation (RON) makes it possible to dispense with cost-intensive external positioning solutions. Currently, the mission expertise accumulated over the past years is also offered as a project-related service. The resulting advantage for port authorities and diving companies: Technology and underwater robotics expertise are exactly there when and where they are needed, without having to develop own technologies. This also eliminates the need for clients to search for well-trained specialists who need to be continuously trained and retained within the company. As partial aspects of the service offer, 3D sheet pile surveying and ship hull inspection are presented here as examples.

## Autoren

Dipl.-Oz. Hedda Precht ist selbstständige Fachjournalistin in Hamburg.

Thomas Vonach ist General Manager der subdrone GmbH in Lauterach, Österreich.

[thomas.vonach@subdrone.com](mailto:thomas.vonach@subdrone.com)

## Einleitung

Die Häfen als Dreh- und Angelpunkte des Warenumschlages und weltweit vernetzter Wertschöpfungsketten nehmen eine Schlüsselrolle in der Verkehrsplanung der Zukunft ein. Maßgeblich für ihre 24/7 Performance ist die lückenlose Überwachung und Wartung der oft über Jahrzehnte gewachsenen Infrastruktur des Hafennutzungsgebietes. Ein wichtiges Augenmerk gilt hier den Spundwandkonstruktionen. Insbesondere an den Kaikanten verursachen die immer größeren Krananlagen, die für das Be- und Entladen der bis zu 400 m langen Containerschiffe benötigt werden, einen er-

heblichen Anstieg der Lasten (Forschungsprojekt TUHH, 2010–2012). Die regelmäßige Analyse der stark beanspruchten modularen Spundwände ist insbesondere unter dem Aspekt des Detektierens von Schlosssprengungen notwendig.

Auch das sensorische Abtasten vom Schiffsrümpfen im Hinblick auf Schmuggelware oder sonstige unerwünschte Fremdkörper rückt in einer globalisierten Welt in den Fokus, wenn es um sichere Transportwege geht. Gleiches gilt für die steigende Nachfrage an remote durchgeführten In-Water Surveys (IWS) für die Schiffsrumpfspektion zum Einhalten der Klassifikationsvorschriften.

Traditionell sind für solche Aufgaben Taucher im Einsatz, die bei teils trüber Sicht im sediment-beladenen Wasser von Binnenhäfen ihre Analyseaufgaben unter hohem Zeit- und Kostendruck durchführen. Auch ROVs (Remotely Operated Vehicles) werden für diese Aufgaben zunehmend eingesetzt. Der Nachteil an dieser Methode liegt darin, dass ausschließlich qualifizierte Piloten die Messungen durchführen können. Zudem sind sie ebenfalls auf Sicht angewiesen – damit stellt auch die optimale Positionierung eine Herausforderung dar. Zukünftig sind diese Aufgabenstellungen ideale Einsatzgebiete für speziell ausgestattete AUVs.

### Autonomie für Unterwasserrobotik

Das subdron-Team setzt sich aus europäischen Experten der Unterwasserrobotik zusammen. Mit dem Ziel, Unterwasservermessungsdaten autonom und tiefenunabhängig zu erfassen und bedarfsgerecht aufzuarbeiten, setzt die Crew die Idee von »Robotics as a Service« in die Tat um. Ein von subdron entwickeltes Gesamtsystem kann sich auf Grundlage proprietärer Navigationsalgorithmen stabil, sicher und autonom im objektrelativen Bereich von ein bis zwei Metern fortbewegen. Auch das Navigieren in sehr beengten Umgebungen ist möglich. Durch eine spezifische, ins Fahrzeug integrierte Sensorik für die Umgebungswahrnehmung werden Daten generiert und verarbeitet, die direkt in den Navigationsalgorithmus einfließen. Das ist der Kern der proprietären Relativen Objekt-Navigation (RON) von subdron. Durch RON kann gewährleistet werden, dass sich das Fahrzeug stets in gewünschter Position und Orientierung zum Objekt bewegt. RON als Software- und Hardwarepaket macht es möglich, auf kostenintensive externe Positionierungslösungen zu verzichten. Auch die bildgebende Sensorik ist ausgeklügelt. Sie wird in der idealen Lage und Position ausgerichtet, um die bestmögliche Datenerfassung zu gewährleisten. Das wiederum führt dazu, dass jeder analysierte Strukturbereich mit derselben Auflösung abgebildet wird. So können auch anspruchsvolle Inspektionsaufgaben realisiert und mit hoher Detailtiefe ausgewertet werden. Die Feldtests der Systeme werden in der subdron-Testanlage am Bodensee absolviert, und im Hamburger Hafen sowie in Bremerhaven wurden und werden weiterführende Tests durchgeführt. Auch erste beauftragte Untersuchungen haben bereits überzeugende Ergebnisse geliefert.

### Performantes Trägerfahrzeug

Das Trägerfahrzeug ist ein leistungsstarkes Sparus II AUV von IQUA Robotics (Abb. 1), dessen Soft- und Hardware von subdron modifiziert wurde. Es handelt sich um ein torpedoförmiges Schwebefahrzeug mit missionsspezifischem Nutzlastbereich und effizienter Hydrodynamik für eine lange autonome Betriebszeit. Dieses Hovering-AUV wurde für den Einsatz in offenen Gewässern ent-

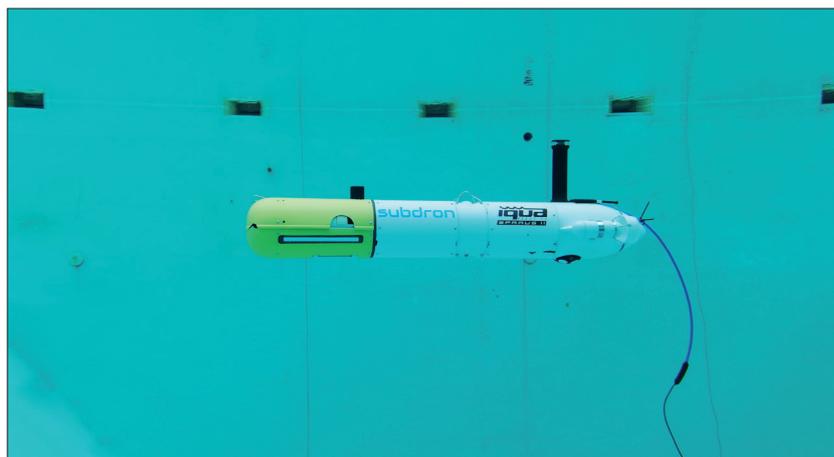


Abb. 1: AUV-Plattform Sparus II zu Versuchen im Testtank

© Alle Abbildungen: subdron GmbH

wickelt, hat eine Länge von 160 cm, einen Rumpfdurchmesser von 23 cm und ein Gewicht von 52 kg in Luft. Damit ist es klein, leicht und wendig. Mit einer Geschwindigkeit von bis zu drei Knoten und einer Betriebszeit von acht bis zehn Stunden können auch umfangreiche Einsätze tageweise geplant werden. Für die Missionsprogrammierung wird eine offene, auf ROS (Robot Operating System) basierende, Softwarearchitektur verwendet (Carreras et al. 2015).

### Technische Spezifikation

Für die Navigation an der Wasseroberfläche nutzt das AUV eine GPS-Antenne, um seine Position zu bestimmen. Die Navigation unter Wasser erfolgt mit einem Inertialen Navigationssystem (INS), mit dessen Hilfe die Beschleunigung und die Winkelgeschwindigkeit des AUVs im dreidimensionalen Raum bestimmt werden kann. Für das Koordinieren der genauen Fahrtrichtung und Geschwindigkeit über Grund wird ein nach unten schauendes Doppler Velocity Log (DVL) genutzt. Auch klassische Sensorik kommt bei diesem AUV zum Einsatz: Ein Drucksensor meldet, in welcher Tiefe sich das AUV aktuell befindet. Für den Einsatz im offenen Gewässerbereich steht ein USBL-System (Ultra Short Baseline) zur Verfügung, um das abgetauchte AUV zu positionieren und eine Kommunikation aufrechtzuhalten. Frequenzbedingt (Multipathing etc.) ist das USBL-System im Hafengebiet jedoch nur begrenzt einsetzbar. Alle hier ermittelten Daten werden genutzt, um beim Postprocessing der Punktwolken die Positionsdaten zu validieren.

Je nach Missionsanforderung und gewünschter Datengüte kann subdron innerhalb von acht bis zwölf Stunden mit einer einzigen Akkuladung ein bis zwei Kilometer einer Hafenanlage vermessen. Für solch einen Einsatz sind üblicherweise zwei bis drei Mitarbeiter im Einsatz, um Parameter wie die gewünschte Scan-Länge und -Tiefe ins System einzupflegen. Da die Anwender-Interaktion kontinuierlich weiterentwickelt wird, wird es perspektivisch möglich sein, eine Mission mit einem

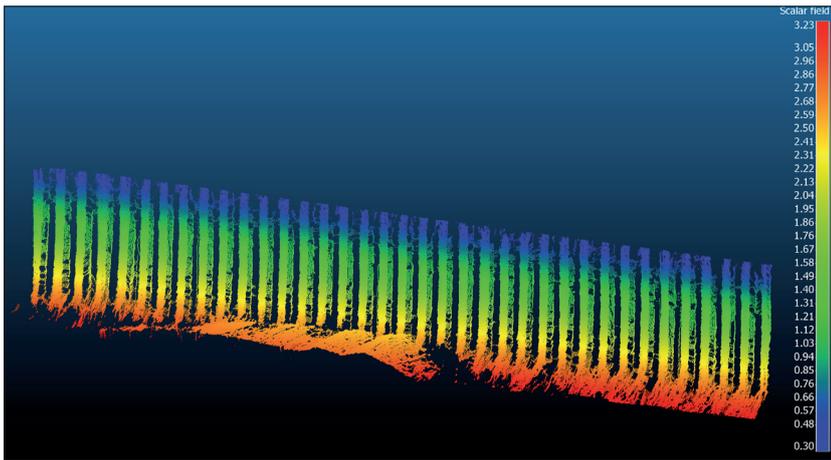


Abb. 2: Spundwandbereich mit Anhäufung im Grundbereich im Hafen Stuttgart

»Nicht-Robotik-Experten« und einer Hilfskraft vor Ort durchzuführen.

### Bedarfsorientierte Datendichte

Um eine maximale Auflösung zu erreichen, beträgt der optimale Abstand zwischen dem Fahrzeug und dem zu vermessenden Objekt 1,5 bis 2,5 m. Wenn eine größere Flächenleistung gewünscht wird, kann dieser Abstand vergrößert werden. Diese größere Flächenleistung führt jedoch zu einer geringeren Auflösung. Vor einem Missionsstart werden die Sensoren des Gesamtsystems kalibriert, sie liefern bis zu einen Tag lang präzise Messergebnisse. Sollte die Mission es erfordern, kann eine erneute Kalibrierung schnell erfolgen. Mit einer Auflösung von 1 cm ist die Messgenauigkeit hervorragend dafür geeignet, auch kleine Strukturen aufzulösen. Zur Relevanz hochauflöster 3D-Daten in der Bauwerksgeometrie siehe auch Hesse et al. (2019).

### Gesetzliche Vorgaben

Je nach Einsatzort und -zweck des Mess-AUVs, müssen Genehmigungen der Hafenbehörden

eingeholt werden. Auch strom- und schiffahrtspolizeiliche Genehmigungen können erforderlich sein. Durch die enge Zusammenarbeit aller am sicheren Hafenbetrieb beteiligten Institutionen werden diese Genehmigungen üblicherweise innerhalb weniger Tage erteilt.

### Schnell einsatzbereit

Der bei Vermessungsaufgaben übliche Vorlauf reicht aus, um ein AUV an innereuropäische Einsatzorte zu bringen. Ebenso können Einsätze außerhalb europäischer Gewässer schnell in die Wege geleitet werden: Ein Transport des AUV per Luftfracht ist durch eine Zertifizierung des Lithium-Ionen-Akkus für den Lufttransport gegeben. Je nach Umgebungsbedingungen, kann das AUV unkompliziert von Bord eines kleinen Bootes zu Wasser gelassen oder auch komfortabel von der Wasserkante aus eingesetzt werden.

### Bildgebende Sensorik: Standardanwendung oder individuell angepasst

Für Bathymetrie- und Side-Scan-Sonar-Anwendungen stehen ein MBES mit 260 kHz, ein Side-Scan-Sonar mit 1,1 MHz sowie ein MBES mit 2,25 MHz als separate Payload mit vollem Funktionsumfang zur Verfügung. In Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen kann das AUV mit weiteren Technologien bestückt werden – beispielsweise können Kameras oder Laser zum Einsatz kommen.

### Prozessierungsalgorithmus liefert Datenformat

Je nach Anforderung, können die ermittelten Daten als Punktwolke in xyz sowie über gängige Verarbeitungsprogramme aufbereitet und übergeben werden. Hierfür durchlaufen die Daten nach Abschluss der Mission einen eigens entwickelten Prozessierungsalgorithmus, in dem die Fächerdaten mit den Navigationsdaten korreliert und damit georeferenziert werden. Mit einer Dichte von 10 000 Messpunkten je m<sup>2</sup> (oder 1 Messpunkt je cm<sup>2</sup>) liefert die subdrone-Technologie eine hohe Auflösung, die aktuell um den Faktor 100 höher ist, als die des 2016 an Bord des Vermessungsschiffs *Seeadler* installierten MBES mit einer maximalen Punktdichte von 100 bis 120 Messpunkten je m<sup>2</sup> an der Containerkaje im unteren Bereich vor fünf Jahren (Döscher 2019). Mit der jetzt erreichbaren Auflösung können auch kleine Verformungen erkannt werden. Sobald das AUV seine Mission beendet hat und die Prozessierung abgeschlossen wurde, erhalten die Auftraggeber die Daten im gewünschten Format.

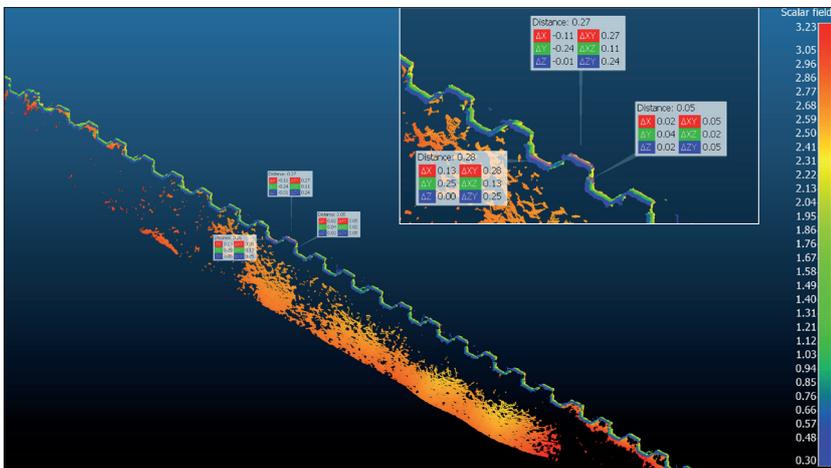


Abb. 3: Ansicht von oben zur Darstellung der Regelmäßigkeit der Spundwand im Hafen Stuttgart. Der vergrößerte Bildausschnitt zeigt die Vermessung der hinteren Wannenbreite (28 cm), der vorderen Wannenbreite (27 cm) und der Schlossbreite (5 cm)

### 3D-Spundwandvermessung mit 10 000 Messpunkten pro Quadratmeter

Am Beispiel einer Spundwandvermessung über einen Längenabschnitt von 30 m und einer Tiefe von 3 m in Stuttgart zeigen die Abb. 2 und Abb. 3

die Detailtiefe einer Vermessung an Bauwerksabschnitten. Für die Aufnahmen wurde das Messsystem p.dron eingesetzt. Das AUV wird via subdrons proprietärer Relativer Objekt-Navigation gesteuert und dient als Trägerfahrzeug für die Navigation und das MBES mit 2,25 MHz. Die Messergebnisse vom 16. September 2021 zeigen eine hochaufgelöste 3D-Punktwolke mit ca. 10 000 Messpunkten pro m<sup>2</sup>, sie weisen keine Unregelmäßigkeiten auf. Das System wurde durch die Bestimmung der Auflösung der Aufnahmen eines intakten Bauwerksabschnitts sowie der Schlösser verifiziert.

Nicht abgebildet werden die rechtwinkligen Flanken und der hintere Böschungsbereich. Die vollflächige Abtastung einer Spundwand mit geneigten Flanken zeigt [Abb. 4](#).

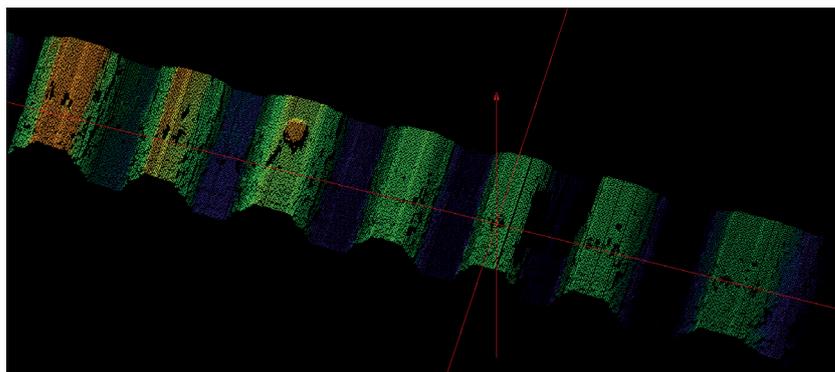
### Nachweis eines Fremdobjekts bei einer Schiffsrumpfspektion

Dass die hochauflösende Bildgebung eines von subdron entwickelten Systems auch für das Scannen von Schiffsrümpfen geeignet ist, wurde im Hamburger Hafen unter Beweis gestellt. Im sedimentbeladenen Wasser des Hamburger Hafens mit einer Sichtweite von 30 bis 50 cm wurde ein Fremdobjekt mit den Maßen 55 × 35 × 15 cm aufgespürt, das am Rumpf eines Zollschiffes von 20 m Länge befestigt worden war. Im Ausschnitt der Punktwolke ist die 3D-Rekonstruktion des Fremdkörpers am Schiffsrumpf klar durch orange eingefärbte Punkte zu erkennen ([Abb. 5](#)). Unter Außerachtlassung des Mission-Set-ups betrug die Aufnahmedauer für diesen Scan vom Fieren bis zum Bergen des AUVs etwa eine halbe Stunde.

Dieser Test unter dem Zollschiff lieferte wertvolle Erkenntnisse für die weitere Entwicklung der stabilen Navigation unter großen Handelsschiffen. Diese sollen bei IWS-Inspektionen (IWS: in-water survey) zum Tragen kommen. Ebenso werden sie eine wertvolle Unterstützung beim Erstellen von außertourlichen Schadensgutachten (damage inspections) nach einer Grundberührung oder bei Beschädigungen durch Anlegemanöver sein.

### Zusammenfassung und Ausblick

Bei Hafeneinsätzen hat sich das Servicepaket der subdron GmbH als sinnvolle Unterstützung für

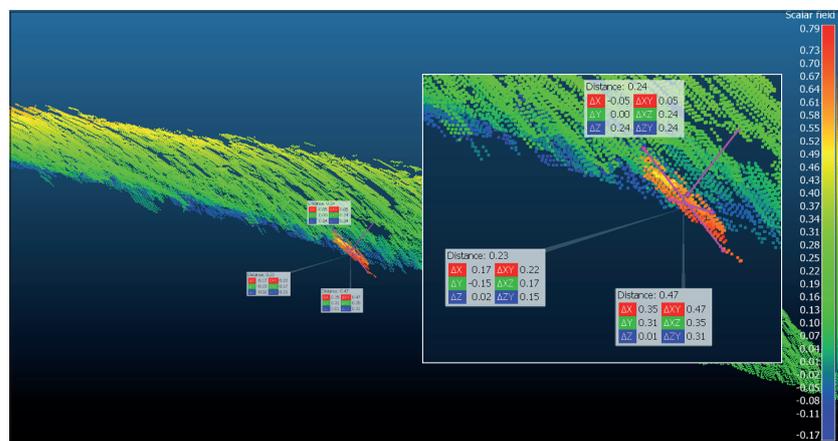


© Alle Abbildungen: subdron GmbH

**Abb. 4:** Vollflächiger Scan einer Spundwand. Im linken Abschnitt ist ein Betonstein als Testobjekt zu sehen. Maße des Betonsteins: 20 × 20 cm

schnell zu realisierende Vermessungsaufgaben bereits bewährt. Auch wenn subdron die Entwicklung von IWS-Einsätzen forciert, ist das p.dron-Messsystem in den aktuellen Anwendungen komplementär zu oberflächen- oder schiffsgelassenen autonomen Messsystemen zu sehen.

Durch die generisch einsetzbare und adaptierbare Systemsteuerung via RON entsteht darüber hinaus eine Vielzahl weiterer Anwendungsfelder. Beispiele für zukünftige Robotics-as-a-Service-Einsätze sind die Infrastrukturüberwachung in Häfen und auf Wasserstraßen, der Bereich der Port Security, Talsperreninspektionen sowie das Erfassen von Near- oder Offshore-Strukturen. //



**Abb. 5:** Abbildungsmöglichkeit des aufgespürten Fremdobjekts am Schiffsrumpf. Der vergrößerte Bildausschnitt zeigt die Ergebnisse der Schiffsrumpfmessung in Metern

### Literatur

- Carreras, Marc; Carles Candela et al. (2015): Testing SPARUS II AUV, an open platform for industrial, scientific and academic applications. Sixth International Workshop on Marine Technology, Martech 2015, arXiv:1811.03494
- Hesse, Christian; Karsten Holste et al. (2019): 3D HydroMapper – Automatisierte 3D-Bauwerksaufnahme und Schadenserkennung unter Wasser für die Bauwerksinspektion und das Building Information Modelling. Hydrographische Nachrichten, DOI: 10.23784/HN113-03

- Thorsten Döscher (2019): Multibeam-Vermessung von Spundwänden – Möglichkeiten und Grenzen anhand von Untersuchungen in Bremerhaven. Hydrographische Nachrichten, DOI: 10.23784/HN113-04
- Forschungsprojekt TUHH (2010-2012): Entwicklung von effizienten Dimensionierungsgrundlagen für die Tragbohlen kombinierter Stahlspundwände. Projektlaufzeit: 2010-2012, Stand: 14.07.2020 (hst), Sachbearbeiter: Christoph Schallück