Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

RoboVaaS
Schlussbericht

Dr. Alexander Duda
Dr. Jakob Schwendner
Kraken Robotik GmbH

Kraken Robotik GmbH
Am Hohentorshafen 3
28197 Bremen
Germany

Amtsgericht Bremen HRB 32040
USt-ID Nummer DE309960397
Steuernummer 60/120/13068
Geschäftsführer Dr. J. Schwender, G. Reid

Tel: +49- (0)421-40894660
Fax: +49- (0)421-40894669

Förderkennzeichen: 03SX463A
Projektkoordinator: Fraunhofer CML (CML)
Projektpartner: Kraken Robotik GmbH (KRG)
Universität von Padova (SIG)
Technische Universität Hamburg (SMP)
SonarSim Ltd (SSL)
Universität von Limerick (CRIS)
Hamburg Port Authority A.ö.R. (HPA)

Teil I - Kurzdarstellung des Vorhabens

Das Verbundprojekt Robotic Vessels as-a-Service (RoboVaaS) des ERA-NET Cofund MarTERA Call 2017 befasst sich mit der Entwicklung, Demonstration und Bewertung von zukünftigen robotergestützten Diensten für die Schifffahrt im küstennahen Betrieb. Hierfür wurden verschiedene Serviceschwerpunkte ausgewählt, die besonders von einer Automatisierung und Digitalisierung profitieren. Die Erwartungshaltung ist dabei, dass bei einer entsprechenden Ausgestaltung die Sicherheit im küstennahen Bereich erhöht und die Kosten für eine Vielzahl von maritimen Akteuren gesenkt werden kann.

Als Schwerpunkte wurden exemplarisch die drei unten aufgeführten Service realisiert und validiert, die in hohem Maße auf andere Sektoren wie Offshore, maritime Sicherheit, Öl und Gas sowie Aquakultur übertragbar sind:

- Der Strandungsvermeidungs-Service (engl. anti-grounding service) ermöglicht es einem Schiffsbetreiber ein autonomes Oberflächenfahrzeug zu buchen, das vorausfährt, um ein Schiff sicher durch seichtes Wasser zu führen.
- Der Inspektionsdienst (engl. inspection service) ermöglicht es einem Schiffsbetreiber eine robotergestützte Inspektion des Schiffsrumpfs und der Schiffsschraube mit teil-autonomen Oberflächen- und Unterwasserfahrzeugen zu buchen, während es einen regulären Hafenaufenthalt hat.
- Der Datenerfassungsdienst (engl. data collection inspection service) ermöglicht es unterschiedlichen maritimen Akteuren eine kosteneffiziente Messung von verschiedenen Messgrößen wie z.B. Schiffsemissionen auf Wasserstraßen mittels autonomen Oberflächenfahrzeugen durchführen zu lassen.

Die Projektdurchführung wurde durch folgendes Konsortium realisiert, dass durch seine Konsorten alle wichtigen wissenschaftlichen und technologischen Disziplinen abdecken konnte, die für eine erfolgreiche Service-Validierung erforderlich waren:

- Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen (CML),
- Kraken Robotik GmbH (KRG),
- Hamburg Port Authority (HPA),
- SmartPORT Forschungsgruppe (SMP) der Technischen Universität Hamburg,
- Mobile & Marine Robotics Research Centre (MRC) der Universität Limerick
- SonarSim Ltd (SSL)
- SIGNET Forschungsgruppe (SIG) der Universität Padua.

Administrative untergliedert sich das Verbundprojekt Robotic Vessels as-a-Service (RoboVaaS) in mehrere Teilvorhaben, die jeweils durch Projetträger des jeweiligen Landes des teilnehmenden Konsorten koordiniert werden.

In dem vorliegenden Fall liegt der Berichtsschwerpunkt auf den Arbeiten im Rahme des Teilvorhabens RoboVaaS-Sensor durchgeführt von der Kraken Robotik GmbH. Die Arbeiten beinhalten dabei insbesondere die Entwicklung, Integration und Validierung von Sensoren für den oben definierten Inspektionsdienst.

Inhaltsverzeichnis

Teil I - Kurzdarstellung des Vorhabens ... 2

1. Motivation und Projektziele ... 4

2. Projektvoraussetzungen ... 5

3. Planung und Ablauf des Vorhabens ... 6

Arbeitspakte (Work Packages – WP) ... 6

Meilensteine des Verbundprojektes ... 8

Über die gesamte Projektlaufzeit wurden mehre Meilensteine definiert, die den Fortschritt des Verbundprojektes widerspiegeln. Die Fälligkeiten, Beschreibungen sowie die Mitverantwortlichkeit vom Teilvorhaben RoboVaaS-Sensor an den einzelnen Meilenstein ist in Tabelle 1 aufgeführt. ... 8

Spezifische Planung des Teilvorhabens ... 9

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand ... 11

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen ... 12

Teil II - Eingehende Darstellung ... 14

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse ... 14

WP 2.2: Analyse der Anforderungen an das 3D Sensorsystem ... 14

WP 2.3: Ausarbeitung der Softwareschnittstellen für den 3D Sensor ... 16

WP 3.2: Real Time Web-Based User Interface (UI) ... 18

WP 3.3 Service Algorithms & Pre-Processing ... 21

WP 4.4 Over- & Underwater Network Integration ... 24

WP 5.2 Unmanned Underwater Vessels (UUVs) ... 24

WP 5.3 Underwater Imaging Sensor ... 25

WP 6.1 Virtual Full-Scale Simulations ... 37

WP 6.2 Real large-Scale Operations ... 38

WP 6.4 Service Demonstration ... 44

WP 6.5 Feasibility & Performance Assessment ... 44

WP 7.2 Dissemination ... 45

WP 7.3 Exploitation ... 46

2. Wichtigste Positionen des Zahlenmäßigen Nachweises ... 47

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit ... 47

4. Voraussichtliches Nutzen ... 47

5. Fortschritt bei anderen Stellen ... 47

6. Veröffentlichung nach Nr. 11 ... 49

1. Motivation und Projektziele

Die kontinuierliche Zunahme des Automatisierungs- und Digitalisierungsgrades in allen Industriezweigen verbessert ständig die technologische Effizienz. Heute ist die Schifffahrt mit 90 % der transportierten Güter der größte internationale Transportsektor [1]. Die Globalisierung und neue Umweltgesetze führen dabei zu einem steigenden Bedarf an neuen technologischen Entwicklungen für die Schifffahrtsindustrie. Die globale Vision der Schifffahrt 4.0 umfasst hier integrierte intelligente, eingebettete Systeme mit einem hohen Maß an Autonomie, Cloud Computing, Big-Data-Analytik und mobile Dienste [2][3].

In diesem Kontext ist ein vielversprechender Technologietrend das Angebot von Software, Plattformen oder Infrastrukturen als Service, wodurch die Nutzer Geld sparen, flexibel sind und immer Zugang zu den neuesten Technologien bekommen. Aus dieser Motivation heraus leiten sich die folgenden Projektziele des Verbundprojekts RoboVaaS ab:

- Ausarbeitung verschiedener RoboVaaS-Dienstleistungen und Spezifikationen.
- Erstellung einer Infrastruktur und Plattform für o.g. Dienstleistungen durch Entwicklung von:
    - Kommunikationsnetzwerk für zuverlässigen Datentransfer zwischen den unbemannte Roboterschiffe (UVs).
    - Software zur angemessenen Überwachung und Steuerung der UVs.
    - Web-basierte Echtzeit-Benutzeroberfläche zur UV-Kontrolle sowie Buchung und Interaktion mit den RoboVaaS-Dienstleistungen.
- Demonstration und Bewertung der RoboVaaS-Dienstleistungen durch:
    - Vorbereitung von UVs für den Einsatz als Service (durch Anpassung und Weiterentwicklung bestehender Systeme von Verbundpartnern).
    - Entwicklung und Spezialisierung von Sensortechnologien sowie Integration in die o.g. Systeme.
    - Entwicklung von spezifischer Software für die einzelnen RoboVaaS-Dienstleistungen.
- Erstellung eines Verwertungsplan, um das RoboVaaS-Konzept näher an die Marktreife heranzuführen.

Ziel des Teilvorhabens RoboVaaS-Sensor ist dabei die Entwicklung der Sensoren für den Schiffsrumpfinspektion sowie die Integration des Sensorsystems in einen Tauchroboter. In Einzelnem umfassen die Projektziele des Teilvorhabens, durchgeführt von der Kraken Robotik GmbH, folgende Punkte:

- Spezifikation von Umfang und den genauen Anforderungen der 3D Erfassung, die im Rahmen des RoboVaaS Szenarios benötigt werden.
- Entwicklung des 3D Sensors für das RoboVaaS Szenario auf Basis des SeaVisionTM Systems:
    - Erarbeitung neuartiger Konzepte zur Kompensation von Umgebungslicht, um eine Verwendung in Flachwasser zu ermöglichen.
    - Anpassung von Gewicht und Bauvolumen, um die Integration in kleiner ROVs zu ermöglichen.
    - Erweiterung des Webinterfaces, um die Einbindung in die RoboVaaS Service Schnittstelle zu ermöglichen.
- Integration des Sensors in das Zielfahrzeug:
    - Identifikation der optimalen Platzierung des Systems

    - Entwicklung der Haltestrukturen unter Beachtung der Auswirkungen auf das Systemverhalten (Trimm, Beweglichkeit, Trägheit etc.)
    - Produktion der Teile und Integration auf dem Zielsystem
- Evaluierung und Demonstration des Sensors im RoboVaaS Szenario:
    - Test in Simulationsumgebung
    - Test und Evaluation auf Tauchroboter im Demonstrationsszenario
    - Bewertung der Leistung des Systems

2. Projektvoraussetzungen

RoboVaaS-Sensor konzentriert sich auf Strukturen an Schiffen und Hafenanlagen nahe der Wasseroberfläche. Dieser Bereich ist durch das Umgebungslicht, das meist trübere Wasser und die durch die Wellen induzierten starken Bewegungen des Trägerfahrzeugs für Sensorsysteme sehr anspruchsvoll. Daher wird als Grundlage für die Projektdurchführung der SeaVisionTM Unterwasser 3D Lasersensor vorausgesetzt, der für die Inspektion von Strukturen am Meeresboden in Tiefen zwischen 50m und 1200m von der Kraken Robotik GmbH konzipiert wurde.

Die Robotik GmbH ist einer Ausgründung von vier ehemaligen Mitarbeiten des Robotics Innovation Center des DFKIs in Bremen und der in Kanada ansässigen KMU Kraken Robotics Systems Inc. mit dem Entwicklungsfokus von innovativen 3D Sensoren für Unterwasseranwendungen. Das erste Produkt von KRG ist der SeaVisionTM 3D Lasersensor, der auf Basis der langjährigen Erfahrungen der Gründer von KRG in der Forschung und Entwicklung für Offshore Anwendungen basiert, sowie die konsequente Weiterentwicklung der Forschungsergebnisse bezüglich einer Promotionsarbeit [5] darstellt.

Die zwei integrierten HD-Kamera-Systeme unterstützen hohe Framerate mit mehr als 100 FPS, die neben der Erfassung von 3D Daten auch die parallele Aufnahme von Kamerabildern erlauben. Dies ermöglicht die Integration von Algorithmen zur genauen Erfassung der Bewegung relativ zum Messobjekt (Schiff). Diese Technik wird Structure-from-Motion (SFM) genannt und wird inzwischen sehr erfolgreich in terrestrischen Anwendungen eingesetzt, kann aber nicht direkt in den Unterwasserbereich übertragen werden, da die optischen Eigenschaften des Wasser, Schwebeteilchen, Trübung und wechselnde Lichtverhältnisse (z.B. Caustics) die gängigen Algorithmen unbrauchbar machen [5]. Dies gilt insbesondere für den Bereich nahe der Wasseroberfläche. Erste Forschungsarbeiten mit adaptierten Verfahren durch KRG Mitarbeiter haben jedoch gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist SFM auch Unterwasser in Kombination mit Lasersystemen erfolgreich zu verwenden [4]. Das Teilvorhaben RoboVaaS-Sensor setzt direkt auf diesen Vorarbeiten auf.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Arbeitsplan des Verbundprojektes RoboVaaS gliedert sich in sieben Arbeitspakete, die jeweils von einer Arbeitsgruppe, bestehend aus mehreren Verbundpartnern, bearbeitet wurden. Die enge Verknüpfung der einzelnen Arbeitspakete untereinander ist in **Abbildung 1** dargestellt.

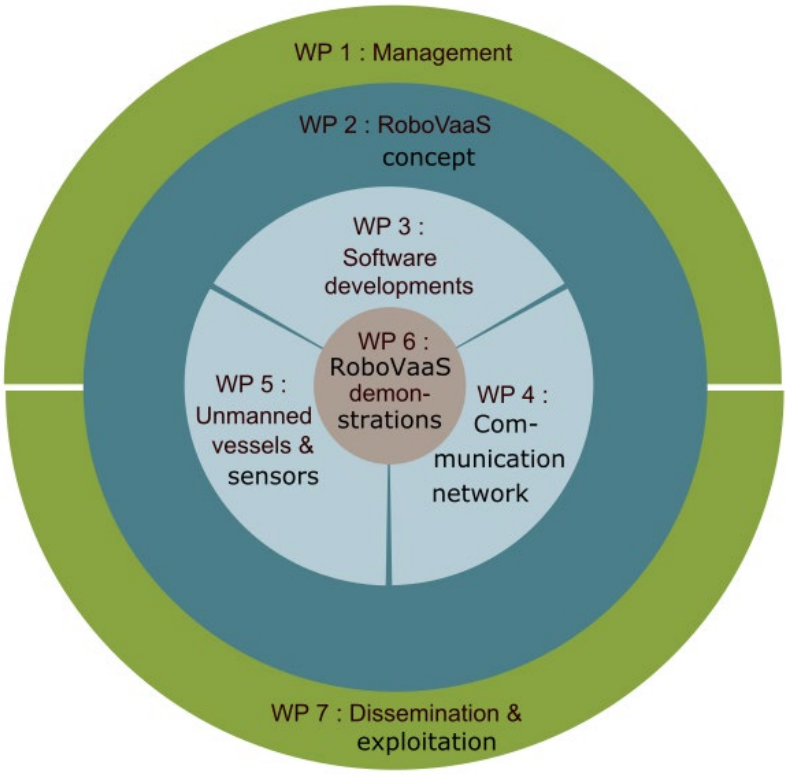


Abbildung 1: Arbeitspakete (Work Packages - WP) von RoboVaaS.

Arbeitspakte (Work Packages – WP)

Ein übergreifendes Arbeitspaket WP1 Management hat dabei die Aufgabe, die Bemühungen der Partner zu koordinieren und das gesamte Projekt auf finanzieller, administrativer, vertraglicher und technischer Ebene zu verwalten. Es umfasst das Arbeitspaket WP2 RoboVaaS-Konzept, das darauf abzielt, das Gesamtsystem zu konzipieren, RoboVaaS-Dienste zu identifizieren, Anforderungen zu definieren und die einzelnen Einheiten zu integrieren. WP2 wiederum umfasst die vier darauffolgenden und voneinander abhängigen Arbeitspakete WP3-WP5, die ihre Ergebnisse in WP6 RoboVaaS-Demonstration einbringen. Der Arbeitsplan wird schließlich durch WP7 Dissemination & Exploitation vervollständigt und umschlossen.

Die allgemeine Beschreibung der jeweiligen Arbeitspakete und die daraus resultierenden geleisteten Arbeiten im Rahmen des Teilvorhabens RoboVaaS-Sensor ergeben sich wie folgt:

WP 1: Management

Das Arbeitspaket umfasst die Gesamtkoordination des Projekts während des gesamten Prozesses bis zum erfolgreichen Abschluss des Projekts. Dazu gehören Berichterstattungen über den

Projektfortschritt und die Finanzen sowie die Organisation von Projektkonsortialtreffen der RoboVaaS-Partner.

WP 2: RoboVaaS Concept
Das Arbeitsparket beinhaltet den Konzeptentwurf der Service-Infrastruktur mit Skalierbarkeit auf verwandte Sektoren wie Meeresressourcen, Offshore-Öl und -Gas, Fischerei, maritime Sicherheit und Aquakultur. Mögliche Dienstleitungen mit Schwerpunkt auf dem Schiffsverkehr wurden dabei mit den Meinungen von Stakeholdern abgeglichen und daraus die Anforderungen für die Demonstrator-Services abgeleitet. Das Teilvorhaben RoboVaaS-Sensor deckt dabei folgenden Arbeiten ab:

- Analyse der Anforderungen an das 3D Sensorsystem (WP 2.2)
- Ausarbeitung der Softwareschnittstellen zum 3D Sensor (WP 2.3)
- Definition der Hardwareschnittstellen zwischen Sensor und ROV (WP 2.3)

WP 3: Software developments
Das Arbeitspaket beinhaltet die Entwicklung benötigter Softwarekomponenten für die Freigabe, Steuerung und Überwachung der unbemannten Schiffe sowie eine Benutzeroberfläche und spezifische Service-Algorithmen sowie die Einrichtung eines RoboVaaS-Datenservers. Das Teilvorhaben RoboVaaS-Sensor deckt dabei folgenden Arbeiten ab:

- Entwicklung eines Moduls für die Verwaltung und Anzeige von 3D-Punktwolken (WP 3.2)
- Entwicklung eines Moduls für die Verwaltung und Anzeige von Kamerabilder (WP 3.2)
- Pre-Processing Algorithmen für Kamerabilder (WP 3.3)

WP 4: Communication Network
Das Arbeitspaket umfasst den Entwurf und die Entwicklung von zwei miteinander verbundenen Kommunikationsnetzen, eines für Über- und eines für Unterwasser. Die Überwasserkommunikation basiert auf neuester IoT-Architektur und Chip-Technologie und wird über vorhandene 3G/4G-Mobilfunknetze aufgebaut. Die Nutzung anderer Kommunikationsmittel wie LoRa, LoRaWAN, SigFox oder Mesh-Netzwerke für die angebotenen Dienste wird untersucht. Das Teilvorhaben RoboVaaS-Sensor deckt dabei folgende Arbeiten ab:

- Einbindung des 3D-Sensors in die Kommunikationsarchitektur (WP 4.4)

WP 5: Unmanned Vessels & Sensors
Das Arbeitspaket beinhaltet die Bereitstellung von unbemannten Schiffen, ausgestattet mit spezialisierten Sensoren, die in der Lage sind, den Service des RoboVaaS-Konzepts gemäß WP 2 durchzuführen. Im Weiteren umfasst es die Optimierung der Sensorik, um die gewünschten Funktionalitäten der Dienste zu ermöglichen. Das Teilvorhaben RoboVaaS-Sensor ist maßgeblich in diesem von Kraken Robotik GmbH koordinierten Arbeitspaket WP5 verankert und umfasst dabei folgende Arbeiten:

- Konzeption der Sensor Integration unter Berücksichtigung der Eigenschaften des ROVs (Auftrieb etc.) und der Inspektionsabdeckung (WP 5.2).
- Auskonstruktion (SolidWorks), Produktion und Beschaffung der Komponenten (WP 5.2)..
- Evaluation von Methoden zur:
    - Beschleunigung des Scan-Vorgangs (WP 5.3)
    - Verbesserung der Lasererkennung im Flachwasser mit Fremdlicht (WP 5.3)

    - Optischen Stabilisierung während des Scan-Vorgangs (WP 5.3)
- Implementierung und Integration der ausgewählten Methoden und Schnittstellen (WP 5.3).
- Entwicklung eines Testaufbaus für Tests und Leistungsabschätzungen (WP 5.3).
- Aufbau und Test der Sensorhardware für den Einsatz im finalen Szenario (WP 5.3).

WP 6: RoboVaaS Demonstration
Das Arbeitspaket dient der Demonstration des RoboVaaS-Konzepts. Die Ergebnisse aus dem WP2, WP3, WP4 und WP5 werden simuliert, integriert sowie Feldtests der Dienstleistungen durchgeführt. Das Teilvorhaben RoboVaaS-Sensor deckt dabei folgende Arbeiten ab:

- Simulation des 3D-Sensors auf Basis synthetischer Daten (WP 6.1)
- Betreuung des 3D-Sensors und Durchführung der Versuche und Demonstrationen (WP 6.2)
- Aufarbeitung der Felddaten und Präsentation des 3D-Sensors (WP 6.4)
- Evaluation des 3D-Sensors im Kontext des RoboVaaS-Konzepts (WP 6.5)

WP 7: Dissemination & Exploitation
Das Arbeitspaket beinhaltet die effektive Kommunikation und Förderung des RoboVaaS-Konzepts gegenüber Stakeholdern und der Öffentlichkeit. Das Arbeitspaket zielt ferner darauf ab, eine fundierte Verbreitungsstrategie zur Verbreitung der RoboVaaS-Ergebnisse zu entwickeln. Das Teilvorhaben RoboVaaS-Sensor deckt dabei folgende Arbeiten ab:

- Grafische Aufarbeitung und Bereitstellung von Ergebnissen des 3D-Sensors (WP 7.2)
- Wissenschaftliche Publikationen und Präsentationen auf Messen (WP 7.2)
- Erarbeitung eines Businessplans und Markteinführungsprograms (WP 7.3)

Meilensteine des Verbundprojektes
Über die gesamte Projektlaufzeit wurden mehre Meilensteine definiert, die den Fortschritt des Verbundprojektes widerspiegeln. Die Fälligkeiten, Beschreibungen sowie die Mitverantwortlichkeit vom Teilvorhaben RoboVaaS-Sensor an den einzelnen Meilenstein ist in **Tabelle 1** aufgeführt**.**

Tabelle 1: Meilensteine des Verbundprojektes.

Arbeits paket	Meilen-stein	Mona t	Beschreibung	Anteil des Teilvorhabens
WP1	M1.1	36	Projektende	mitverantwortlich
WP2	M2.1	6	RoboVaaS-Konzept Design eingefroren	mitverantwortlich
WP2	M2.2	24	RoboVaaS integriert	mitverantwortlich
WP3	M3.1	18	RoboVaaS-Software-Prototyp implementiert	mitverantwortlich
WP3	M3.2	30	RoboVaaS-Software validiert	mitverantwortlich
WP4	M4.1	6	Protokolle bestimmt	mitverantwortlich
WP4	M4.2	18	Unterwasser-Akustik-Modem getestet	nicht beteiligt
WP5	M5.1	18	Unbemannte Fahrzeuge & Sensoren integriert	hauptverantwortlich
WP5	M5.2	30	Unbemannte Fahrzeuge & Sensoren validiert	hauptverantwortlich
WP6	M6.1	20	RoboVaaS Sonarsimulator implementiert	nicht beteiligt
WP6	M6.2	30	RoboVaaS bereit für Service-Demonstration	mitverantwortlich
WP7	M7.1	3	RoboVaaS-Website eingerichtet	nicht beteiligt
WP7	M7.2	33	Webinar für Stakeholder abgehalten	mitverantwortlich

Spezifische Planung des Teilvorhabens

Die Planung des Teilvorhaben RoboVaaS-Sensor leitet sich aus den jeweiligen Mitwirkungen in den einzelnen Arbeitspaketen des Verbundprojektes sowie den dazu gehörigen Meilensteine ab. Die daraus resultierende zeitliche Abfolge der geleisteten Aktivitäten des Teilvorhabens RoboVaaS-Sensor ist der **Abbildung 2** zu entnehmen. Hierbei weicht die reale zeitliche Ausdehnung der Aktivitäten leicht von der ursprünglichen Planung ab, um Personalengpässe sowie Corna bedingte Verzögerung bei der Versuchsdurchführung abzufedern. Diese Veränderungen wurden durch eine bewilligte kostenneutrale Verlängerung des Projekts für alle Verbundpartner realisiert, ohne dabei die Durchführbarkeit der einzelnen Arbeitspakete zu gefährden (Siehe Abbildung 3).

Work package		PM	Start	End
WP1	**Management**	0	1	36
	1.1 Administrative coordination	0	1	36
	1.2 Scientific & technical coordination	0	1	36
WP2	**RoboVaaS concept**	2	1	30
	2.1 Service use case definition	0	1	6
	2.2 Service design & requirements	1	1	15
	Principal Researcher	1		
	2.3 Concept integration	1	13	24
	Principal Researcher	1		
WP3	**Software developments**	3	3	30
	3.1 Data server & monitoring station	0	3	18
	3.2 Real time web-based user interface (UI)	2	3	24
	Principal Researcher	2		
	3.3 Service algorithms & pre-processing	1	6	30
	Principal Researcher	1		
WP4	**Communication network**	1	3	30
	4.1 Network design & optimisation	0	3	18
	4.2 Wireless overwater communication	0	6	24
	4.3 Wireless underwater communication	0	6	24
	4.4 Over- & underwater network integration	1	13	30
	Principal Researcher	1		
WP5	**Unmanned vessels & sensors**	18	3	30
	5.1 Unmanned surface vessel (USV)	0	3	30
	5.2 Unmanned underwater vessels (UUVs)	2	3	30
	Principal Researcher	2		
	5.3 Underwater imaging sensor	16	3	30
	Principal Researcher	0		
	Lead Engineer	16		
WP6	**RoboVaaS demonstrations**	5	6	36
	6.1 Virtual full-scale simulations	1	6	27
	Principal Researcher	1		
	6.2 Real large-scale operations	2	18	30
	Principal Researcher	2		
	6.3 Real small-scale evaluations	0	18	30
	6.4 Service demonstration	1	30	36
	Principal Researcher	1		
	6.5 Feasibility & performance assessment	1	31	36
	Principal Researcher	1		
WP7	**Dissemination & exploitation**	2	1	36
	7.1 Communication & outreach	0	1	36
	7.2 Dissemination	1	1	36
	Principal Researcher	1		
	7.3 Exploitation	1	1	36
	Principal Researcher	1		

Abbildung 2: Gantt-Diagramm für RoboVaaS-Sensor

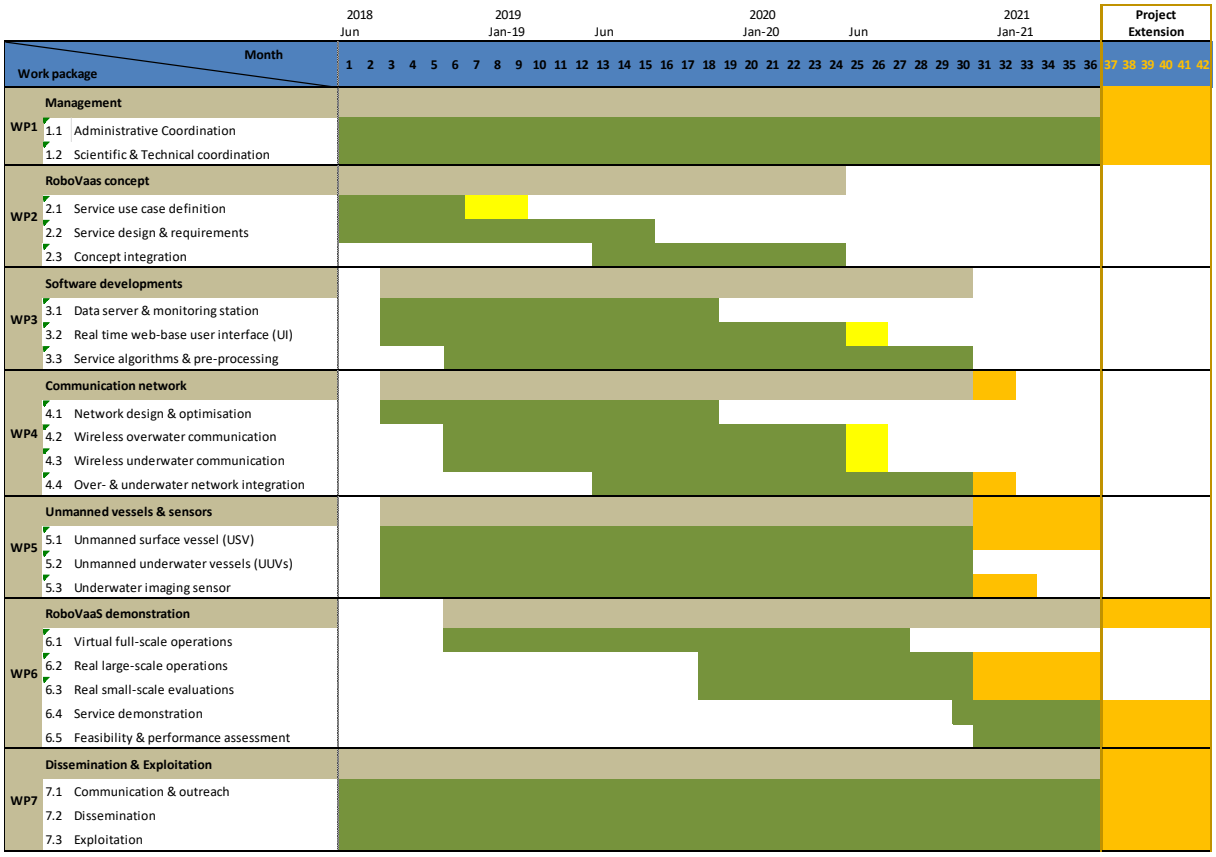


Abbildung 3: RoboVaaS Kostenneutrale Verlängerung

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Inspektionen von Schiffen und maritimen Infrastrukturen werden traditionell von Tauchern durchgeführt. Ein steigender Trend ist allerdings der Einsatz von ROVs und AUVs, um Sicherheit und Arbeitsbelastung zu reduzieren. Dem entsprechend forscht zum Beispiel die Maritime Robotic Group des MIT an Rumpfinspektionen über AUV-Systeme, während DeepTrekker [6] und Aquabotix [7] schon kommerzielle ROV- Beobachtungssysteme anbieten.

Mit dem vermehrten Einzug von autonomen oder ferngesteuerten Unterwasserträgersystemen werden aktuell auch optische Sensoren und Verfahren wie LIDAR, Photogrammmetrie und strukturierte Lichtsysteme immer häufiger in Unterwasseranwendungen eingesetzt. Sie ermöglichen hochgenaue Messungen im direkten Umfeld des Trägersystems durchzuführen. Die Hauptreiber für diese Technologien sind jedoch nach wie vor terrestrische Anwendungen, und es müssen viele Abstriche in kaufgenommen werden, wenn diese Technologien ohne Anpassungen an das Medium Wasser angewendet werden. Um diese Einschränkungen zu überwinden, wurden in den letzten Jahrzehnten verschiedene Techniken vorgeschlagen, die sich mit unerwünschten Effekten wie Lichtbrechung, Rückstreuung und Lichtabsorption befassen [7], [9], [10].

Neuere Hochleistung Unterwasser-Bildgebungssysteme kombinieren daher häufig die räumliche und zeitliche Trennung zwischen Sende- und Empfangssignal, um den erreichbaren Arbeitsbereich weiter zu vergrößern. Ein solches System wird zum Beispiel in [11] als "Pulsed Time-Resolved Laser Line Scan System" vorgestellt. Diese Systeme basieren jedoch auf teurer Hardware und sind in der Regel nicht für die breite Öffentlichkeit zugänglich.

Auf der anderen Seite werden Unterwasser-Lasersysteme, die auf handelsüblichen Komponenten basieren, immer stärker für Unterwasseranwendungen eingesetzt. Eines der bekanntesten Systeme sind strukturierte Linienlichtsysteme, die auf Linienlasern sowie Bildverarbeitungskamera basieren und beispielsweise in den Arbeiten [12], [13], [14] Verwendung finden. Im Gegensatz zu passiven optischen Verfahren wie z.B. die inzwischen weit verbreitete Photogrammmetrie [14], [16] oder Stereo-Systemen erlaubt Lasertriangulation eine aktive Messung und ist weitaus weniger anfällig gegenüber trübem Wasser [11].

Das visuelle 3D-Imaging-Sensorsystem SeaVisionTM [17] von der Kraken Robotik GmbH ist dem entsprechend einer konsequenten Weiterentwicklung von Unterwasser-Lasersystemen basierend auf dem Prinzip der Lasertriangulation zur Berechnung von 3D-Punktwolken. Die Punktwolken können anschließend in einem nachgestellten Schritt zu Vermessungs- und Analysezwecken eingesetzt werden. Konkurrenzprodukte zu SeaVisionTM sind z.B. die Systeme von Voyis, Ocean Tools oder Newton Labs. Der Hauptunterschied zu SeaVisionTM ist, dass alle drei Konkurrenzprodukte eine zusätzliche Einheit zum Rotieren des gesamten Systems brauchen, um eine Punktwolke zu erhalten. Im Gegensatz dazu, können bei SeaVisionTM die Laser im System bewegt werden, wodurch schnellere Messungen mit hoher Genauigkeit durchgeführt werden können.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Verbundprojekt RoboVaaS vereint eine Vielzahl wissenschaftlicher und technologischer Disziplinen. Die einzelnen Mitglieder des Konsortiums, bestehend aus dem Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen (CML), der Kraken Robotik GmbH (KRG), der Hamburg Port Authority (HPA), der SmartPORT Forschungsgruppe (SMP) der Technischen Universität Hamburg, dem Mobile & Marine Robotics Research Centre (MRC) der Universität Limerick, SonarSim Ltd (SSL) und der SIGNET Forschungsgruppe (SIG) der Universität Padua.

Der zugrundeliegende Arbeitsplan von RoboVaaS beinhaltet mehrere Arbeitspakete und Meilensteine, die jeweils einer Arbeitsgruppe bestehend aus mehrere Verbundpartnern zugewiesen wurden. Die Arbeitsgruppenleiter koordinierten dabei die Arbeit pro Arbeitspaket zwischen den Partnern und berichteten direkt an den technischen Leiter. Die Koordinierungsplattform des Konsortiums, die vom administrativen und technischen Manager zusammen mit der Gruppe der Arbeitsgruppenleiter gebildet wird, traf sich während der Projektlaufzeit in einem zweiwöchigen Rhythmus, um den Fortschritt des gesamten Verbundprojektes zu überwachen. Die entsprechende Verwaltungsstruktur vom Verbundprojekt ist in **Abbildung 4** skizziert.

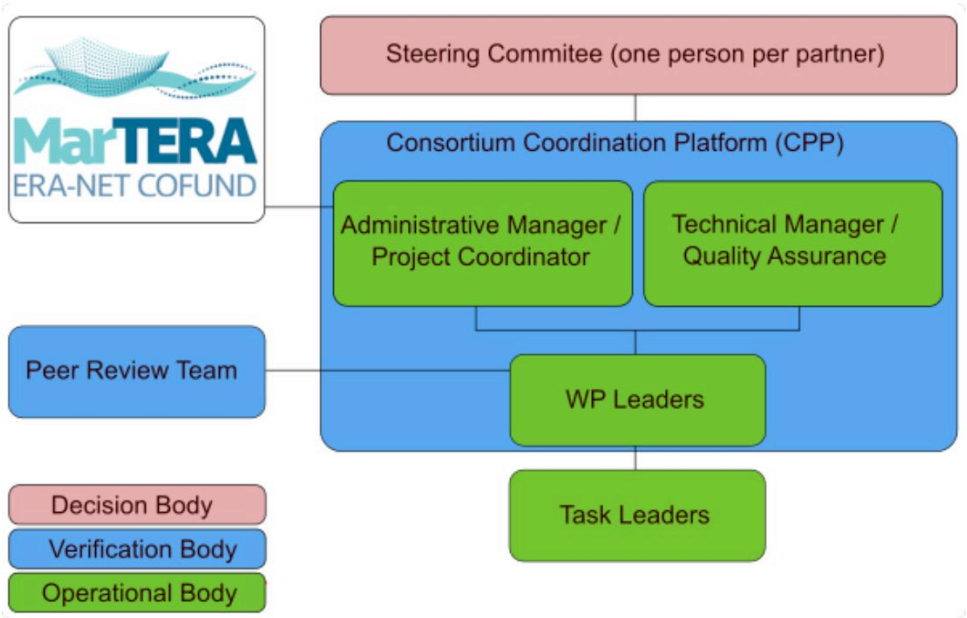


Abbildung 4: Verwaltungsstruktur des Verbundprojektes RoboVaaS.

Nachfolgend sind alle Verbundpartner von der Kraken Robotik GmbH und deren Aufgaben im Verbundprojekt RoboVaaS aufgeführt:

Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen (CML)

Das Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen (CML) aus Hamburg ist eine Einrichtung der Fraunhofer-Gesellschaft. Das CML ist der Hauptkoordinator von RoboVaaS und konzentriert sich auf die Entwicklung der webbasierten Echtzeit-Benutzerschnittstelle und passt sein autonomes Oberflächenfahrzeug (USV) für den Anwendungsfall der Umweltdatenerfassung an.

SIGNET Forschungsgruppe (SIG) der Universität Padua
SIGNET (SIG), ein Labor der Fakultät für Informationstechnik der Universität Padua in Italien. Im Rahmen von RoboVaaS evaluiert die SIG die Kommunikationsprotokolle mit ihrem Netzwerksimulator-Framework (DESERT).

SmartPORT Forschungsgruppe (SMP)
Die Forschungsgruppe smartPORT (SMP) der Technischen Universität Hamburg-Harburg leistet in RoboVaaS einen Beitrag zum Aufbau einer zuverlässigen und effizienten Unterwasserkommunikation und untersucht und bewertet die Nutzbarkeit von AUVs für RoboVaaS-Dienste.

SonarSim Ltd (SSL)
SonarSim Ltd (SSL) ist ein irisches KMU. In RoboVaaS entwickelt SSL seine vorausschauende Sonar-Datensimulationssoftware weiter, um die Entwicklung des auf USV-Sonar basierenden Anti-Grounding-Systems in unübersichtlichen Hafenumgebungen zu unterstützen.

Mobile & Marine Robotics Research Centre (MRC)
Das Mobile & Marine Robotics Research Centre (MRC) der Universität Limerick in Irland modifiziert im Rahmen von RoboVaaS seine bestehenden I-ROV-Systeme, um die maschinelle Bildverarbeitung für den Inspektionsdienst zu ermöglichen. Zudem unterstützt es bei der Entwicklung einer virtuellen Umgebung, um den RoboVaaS-Dienst offline zu demonstrieren.

Hamburg Port Authority (HPA),
Die Hamburg Port Authority (HPA) ist eine Anstalt des öffentlichen Rechts, die für die Verwaltung der Dienstleistungen des deutschen Hafens Hamburg zuständig ist. Im Rahmen von RoboVaaS unterstützt die HPA bei der Definition der Serviceanforderungen und stellt seine küstennahe Infrastruktur für die Systemdemonstration bereit.

Teil II - Eingehende Darstellung

In diesem Abschnitt wird die Mittelverwendung, der erzielte und noch erzielbare Nutzen sowie die Anstrengungen zur aktiven Verbreitung der Erkenntnisse dargestellt. Den Schwerpunkt bildet die ausführliche Darstellung der Projektergebnisse.

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

In Absprache mit den Verbundpartnern wurden die folgenden Arbeitspakete im Rahmen vom Teilvorhaben RoboVaaS Sensor von der Kraken Robotik GmbH durchgeführt. Die Sortierung entspricht dabei der Arbeitspaketnummerierung und ist nicht streng chronologisch. Die zeitliche Abfolge sowie Ausdehnung können dem Gantt-Diagramm in **Abbildung 2** und **Abbildung 3** entnommen werden.

WP 2.2: Analyse der Anforderungen an das 3D Sensorsystem

Ziel: Analyse der angedachten Dienstleistungen im Hinblick auf den 3D Sensor. Definition von Nutzer- und Technologieanforderungen wie z.B. Datengröße und -rate, die über das Unterwassernetz übertragen werden sollen, oder Bildqualität und -rate für den Überwachungsdienst.

Methodik: Mittels Vorabberechnungen und Simulationen werden die Datenraten, Auflösungen und andere Systemparameter des 3D Sensorsystems bestimmt, um den RoboVaaS Inspektionsdienst umsetzen zu können.

Ergebnis: Die Analyse baut auf eine genauere Definition der RoboVaaS Konzepte auf. Diese wurde zum Projektstart im Juni 2018 innerhalb des Kick-Off Treffens ausgelegt und in einem separaten Workshop bei der HPA in Hamburg im August 2018 konsolidiert. Hier wurde für den Inspektionsdienst die Hafenseitige Schiffsrumpf- sowie Spundwandinspektion als vielversprechendes Scenario festgelegt, das in **Abbildung 5** skizziert ist.

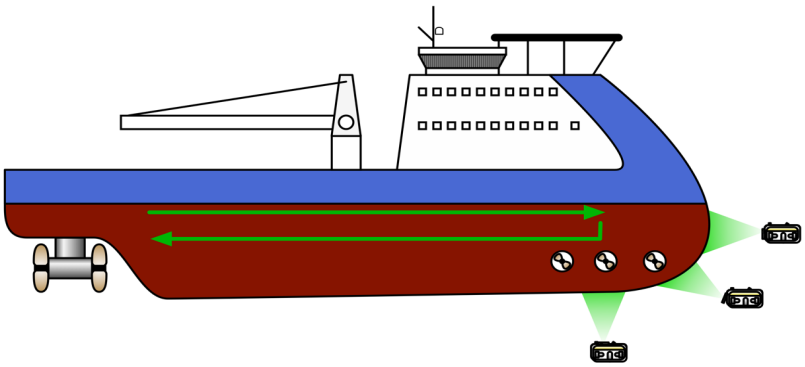


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Schiffsrumpfs Inspektion mittels einem Unterwasserroboter.

In diesem Scenario wird das Sensorsystem von einem Unterwasserträgersystem mit einer Geschwindigkeit von ~ 2km/h entlang des Schiffrumpfes oder Spundwand bewegt, während der Sensor 3D Messungen durchführt. Bei einem gewünschten Abstand zum Messobjekt zwischen 1m und 3.5m für optische Systeme ergeben sich für ein triangulationsbasierten Laser-Systems rechnerisch die in **Abbildung 6** dargestellten Beziehungen, zwischen dem Abstand Laser-Kamera (Baseline) und der erreichbaren Tiefenauflösung (Depth Resolution). Für die allgemeinen

Systemparameter wurde dabei von einem SeaVisionTM System ausgegangen (HD-Kamera, FOV in Wasser 64°, Laserhelligkeit entspricht einer Normalverteilung).

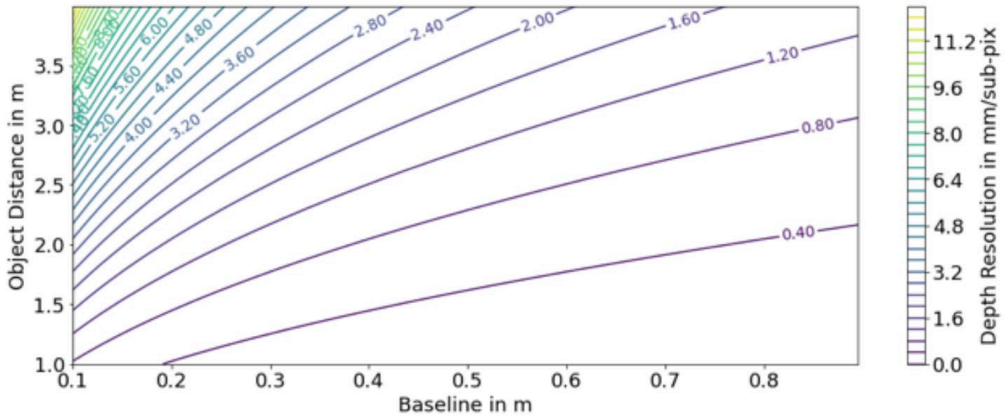


Abbildung 6: Erreichbare Tiefenauflösungen für ein triangulationsbasierten Laser-Systems in Bezug auf Objektabstand und dem Abstand zwischen der Messkamera und der Lasereinheit.

Aus dieser Berechnung ergibt sich, dass für einen mittleren Objektabstand von 2m eine Basislinie von 0.5m eingehalten werden muss, um eine Tiefenauflösung von <= 1mm zu erzielen. Bei der Annahme, dass die Messprofile mit einem mittleren Abstand von 5 mm über die Oberfläche des Messobjektes verteilt sein sollen und das Sensorsystem mit 2km/h bewegt wird, ergeben sich dabei die folgende Datenraten:

- 111 Messbilder pro Sekunde ~ 190 MByte/s Rohdaten
- 111 Laserprofile mit je 1080 Messpunkten pro Sekunde ~ 3.5MByte/s
- 20 Kamerabilder im MJPEG Format pro Sekunde für das Userinterface ~ 2,5MByte/s

Die Rohdaten fallen nur auf dem Sensor selbst an und können für Entwicklungsarbeiten lokal auf einer SSD gespeichert werden. Die Anforderungen an das Unterwasser- und Überwassernetzwerk ergeben sich damit zu:

- Minimale Datenrate 3.5MByte/s (ohne Kamerabilder)
- Minimale Datenrate 6MByte/s (mit Kamerabilder)

Für eine Echtzeitsteuerung des Sensorsystems durch einen optionalen Operator müssen zudem Latzenzzeiten kleiner als 300ms eingehalten werden, um eine möglichst fehlerfreie Steuerung zu ermöglichen [18].

WP 2.3: Ausarbeitung der Softwareschnittstellen für den 3D Sensor

Ziel: Vorbereitung der Integration des 3D Sensors in den Versuchsträger, um das RoboVaaS-Konzept in WP6 zu demonstrieren.

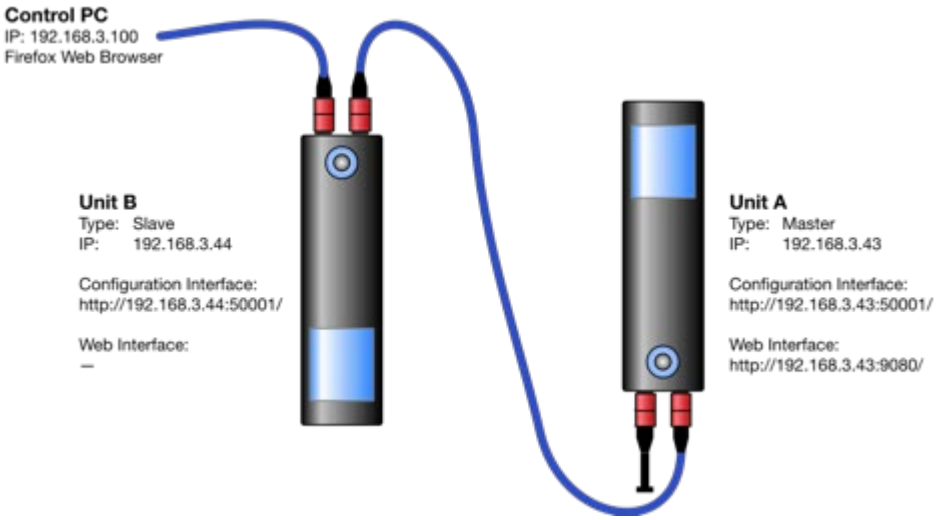
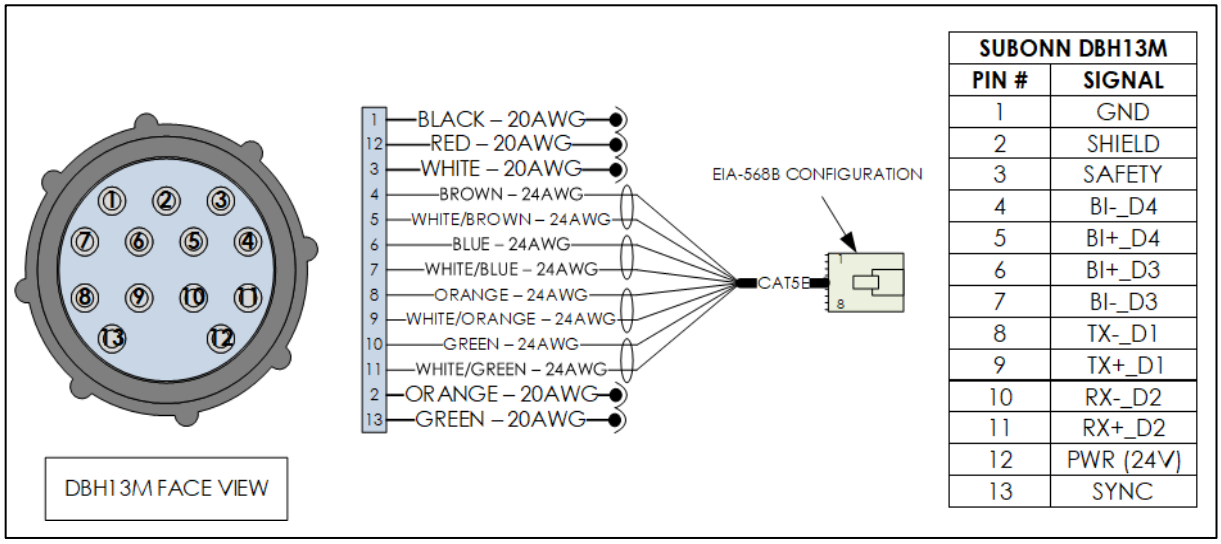


Abbildung 7: SeaVisionTM Netzwerk Topologie.

Ergebnis: Für das Erreichen des Ziels musste die Hardware -und Softwareschnittstellen des SeaVisionTM so ausgestaltet werden, dass eine Integration in das ferngesteuerte Unterwasserfahrzeug vom Verbundpartner Mobile & Marine Robotics Research Centre (MRC) ermöglicht wird. Dazu wurde das elektrische Interface (**Abbildung 8**) mit dem MRC abgestimmt und sichergestellt, dass der Sensor in die Netzwerk-Topologie (**Abbildung 7**) vom Versuchsträger unterstützt wird. Dabei war zu beachten, dass die Anforderungen an die Stromversorgung (Tabelle 2) eingehalten werden und die mechanische Anordnung der **Abbildung 9** entspricht.



SUBONN DBH13M	
PIN #	SIGNAL
1	GND
2	SHIELD
3	SAFETY
4	BI-_D4
5	BI+_D4
6	BI+_D3
7	BI-_D3
8	TX-_D1
9	TX+_D1
10	RX-_D2
11	RX+_D2
12	PWR (24V)
13	SYNC

Abbildung 8: SeaVisionTM Interface für die Integration in Unterwasserfahrzeuge.

Tabelle 2: Anforderungen an die Stromversorgung

SPECIFICATION	DESCRIPTION
Input voltage range	24VDC (<350mV Pk-Pk)
Peak power consumption	100 W (4.2A)
Idle power consumption	30 W (1.25A)
Inrush current	~8 A

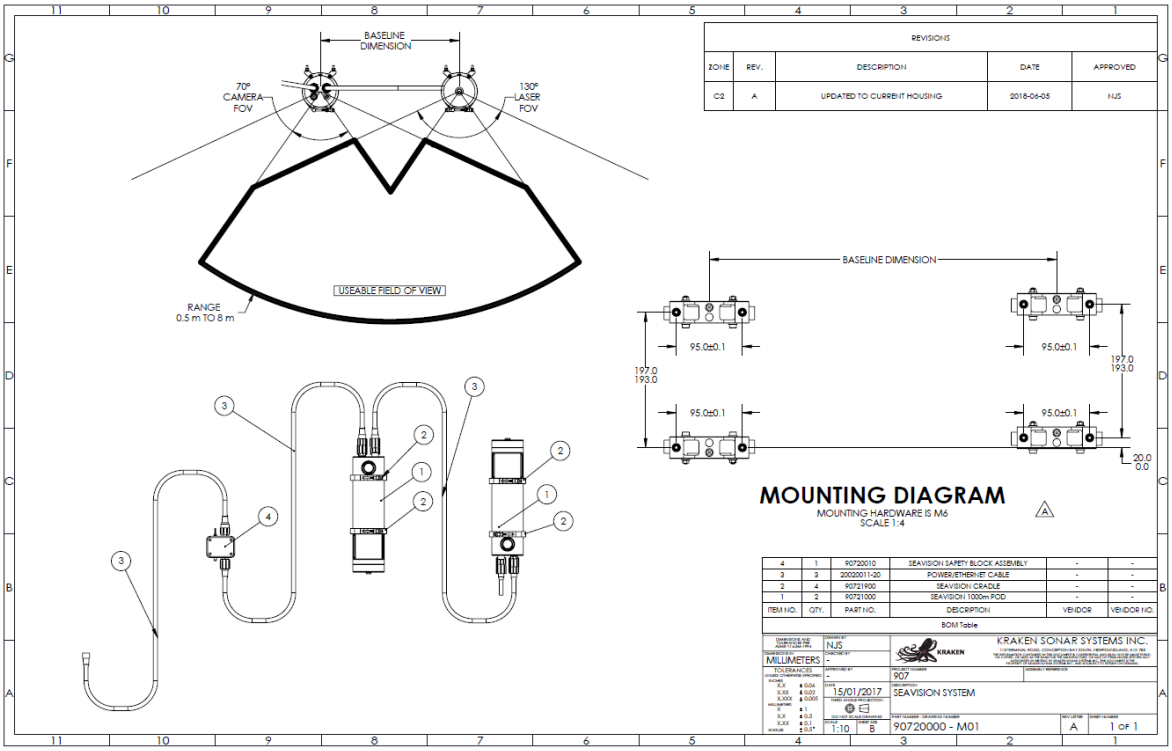


Abbildung 9: SeaVisionTM Befestigungs-Diagramm.

Im Weiteren wurde für die Synchronisation zwischen den Fahrzeugdaten bzw. den Navigationsdaten und dem Sensor-System eine Sync-Schnittstelle vereinbart, die die Uhrzeit auf allen Systemen synchronisiert und während des Einsatzes driftfrei hält. Das Sync-Signal wird mittels eines Pulses pro Sekunde (PPS) implementiert, dass eine scharf ansteigende Flanke hat und sich präzise einmal pro Sekunde wiederholt. Das Signal liegt auf Pin 13 und hat dabei folgende elektrische Spezifikation:

- Logikpegel Low 0..6V
- Logikpegel High 6V…30V
- Nennspannung 12V
- Pulslänge 100ms alle 1000ms +-5ms
- Sync wird bei steigender Flanke ausgelöst

Um einen sicheren Betrieb gemäß der Laserschutzverordnung zu gewährleisten, wurde zusätzlich ein Laser Sicherheits-Pin 3 definiert, der auf 24V gezogen werden muss, um den Laser scharf zu schalten.

Als Softwareschnittstelle wurde ein Real-Time Web-Interface mittels REST-API vereinbart, dass vom Client PC aus verwendet werden kann, um das Sensorsystem zu steuern und Messungen vorzunehmen solange es am gleichem Netzwerk angeschlossen ist.

WP 3.2: Real Time Web-Based User Interface (UI)

Ziel: Implementierung einer webbasierten grafischen Benutzeroberfläche (UI) für die RoboVaaS-Inspektionsdienst, die eine Verwaltung und Anzeige der Daten aus dem 3D-Sensor ermöglicht. Dies umfasst sowohl 3D Punktwolken als auch Kamerabilder.

Methodik: Analyse der bestehender Softwarestruktur für die effiziente Umsetzung eines Benutzerinterfaces basierend auf quelloffenen Webtechnologien. Erstellung von User Stories für die Funktionswahl und Anordnungen der Anzeigelemente.

Ergebnis: SeaVisionTM verwendet das Quelloffene hoch performante gRPC Framework von Google, um verschiedene Service auf den eingebetteten Rechnern miteinander zu verknüpfen. Dadurch ist es möglich zusätzliche, von der eigentlichen Sensorik unabhängige, Service zu implementieren, die zum Beispiel für die Anzeige vom Benutzerinterface zuständig sind.

Für die Implementierung einer echtzeitfähigen Benutzerschnittstelle basierend auf Webtechnologien wurde daher ein neuer Web-Service implementiert, der zwischen den vorhanden gRPC Modulen und dem Web-Browser vermittelt und die Sensordaten für einen einfache Visualisierung aufarbeitet.

Der Web-Browser wird auf dem Client PC gestartet und lädt sich von dem Web-Service die Client-Anwendung in Form von JavaScripten eingebettet in eine Webseite herunter. Der Client baut dabei auf Angular auf, einem quelloffenen TypeScript-basiertem Front-End-Webapplikationsframework. Für die Kommunikation mit dem Web-Service implementiert der Web-Service eine REST-API, die vom Web-Browser aus aufgerufen werden kann

Die implementierte SeaVision-Web-Oberfläche besteht aus drei Hauptkomponenten, die in **Abbildung 10** dargestellt sind und in den folgenden Abschnitten beschrieben werden. Der Funktionsumfang wurde dabei durch die Erstellung von User Stories ermittelt. Die Visualisierung und Anordnung der Anzeigeelement wurde durch mehrere Benutzertests optimiert.

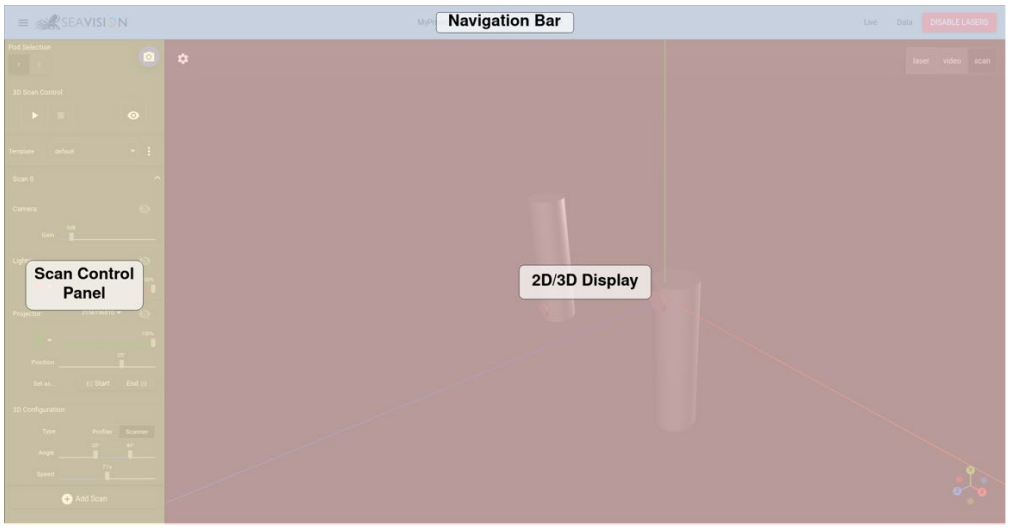


Abbildung 10: SeaVision Web Unterteilung des Hauptinterfaces

Die Navigationsleiste, visualisiert in **Abbildung 11**,befindet sich im oberen Bereich des Web-Interfaces und erlaub die Ausführung von folgenden Aktionen:

1. Ein- und Ausklappen der Scan-Kontrollleiste
2. Auswahl des Unterordners für die Speicherung von Scandaten.
3. Zugriff auf die Live-Preview.
4. Auswahl von aufgezeichneten Scans.
5. Zugriff auf Einstellungen.
6. Notfallschalter, um alle Laser zu deaktivieren.

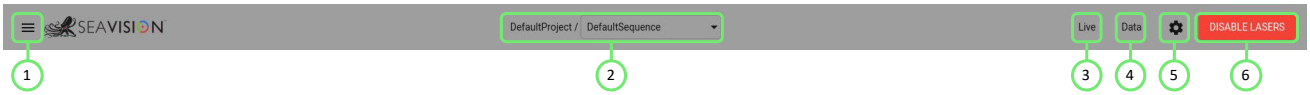


Abbildung 11: SeaVision Web Navigationsleiste

Die Scan-Kontrollleiste, visualisiert in **Abbildung 10**, befindet sich auf der rechen Seite des Web-Interfaces und stellt folgende Aktionen zur Verfügung:

- Auswahl eines SeaVision Systems.
- Manuelle Steuerung der LED-Leuchten, Laser, Servos und Kameras.
- Konfiguration der Scans und Stapel-Scans.
- 3D-Scans starten/stoppen.

Die 2D/3D-Anzeige, gemäß **Abbildung 12**, nimmt den größten Bereich des Web-Interfaces ein. Sie zeigt die 3D-Punkte oder die Kamerabilder an. Mit den Schaltflächen „Video“ und „Scan“ (markiert mit dem Label 3) kann der Benutzer zwischen den beiden Anzeigen wechseln. Die dritte Schaltfläche „Laser“ öffnet eine kleine Anzeige im Bild und zeigt die Lasererkennung, die in **Abbildung 13** visualisiert ist und dem Operator eine bessere System-Parametrisierung ermöglicht.

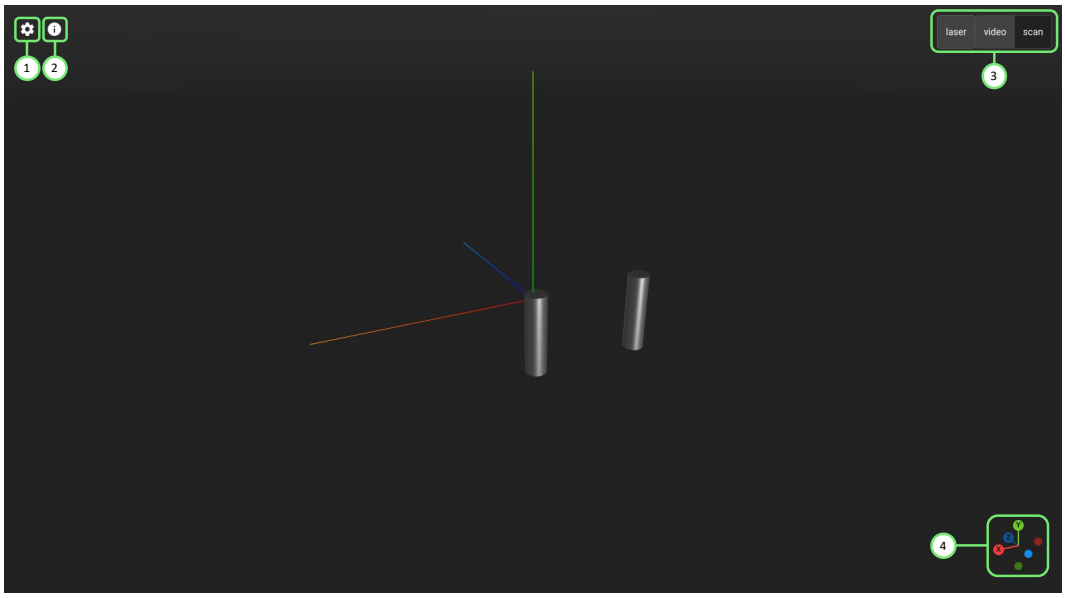


Abbildung 12: SeaVision Web 3D/2D Interface

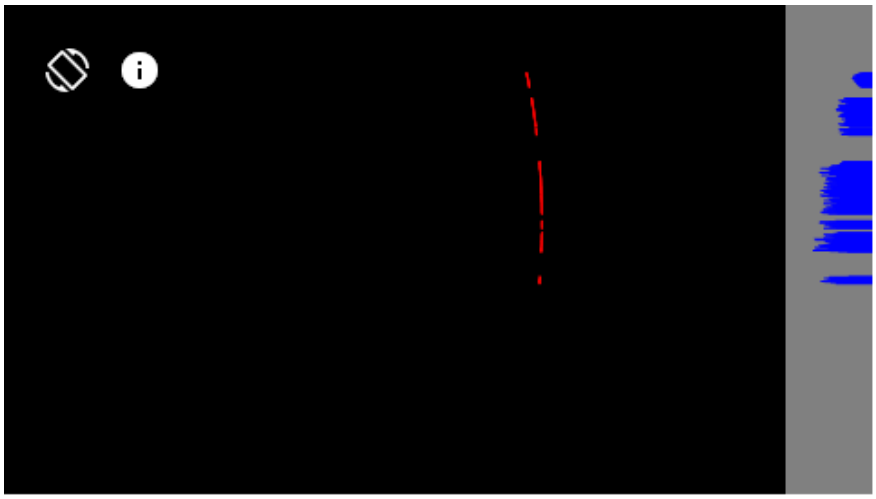


Abbildung 13: SeaVision Web Lasererkennung mit Histogram

Die Videoansicht, dargestellt in **Abbildung 14**, zeigt ein Livebild von der aktuellen Scene aus Sicht des 3D Scanners an. Sie ermöglicht es dem Operator das System entsprechend zu positionieren und Scanparameter zu testen. Oben links im Interface befindet sich eine Schaltfläche zum Drehen des Bildes. Das i-Symbol zeigt Stream-Informationen an, wie z. B. Bilder pro Sekunde, Bitrate und Latenz.

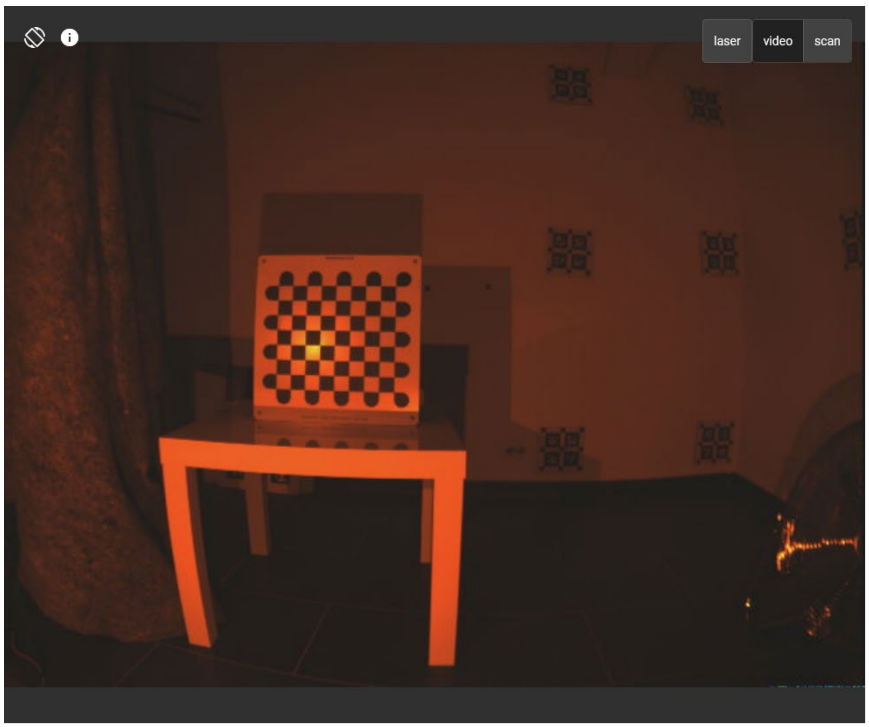


Abbildung 14: SeaVision Web Live Videoansicht

Das Element Log-Daten zeigt aufgezeichnete Punktwolken an, die im Streaming- oder im Mixed-Modus erstellt wurden und vom Client heruntergeladen werden können.

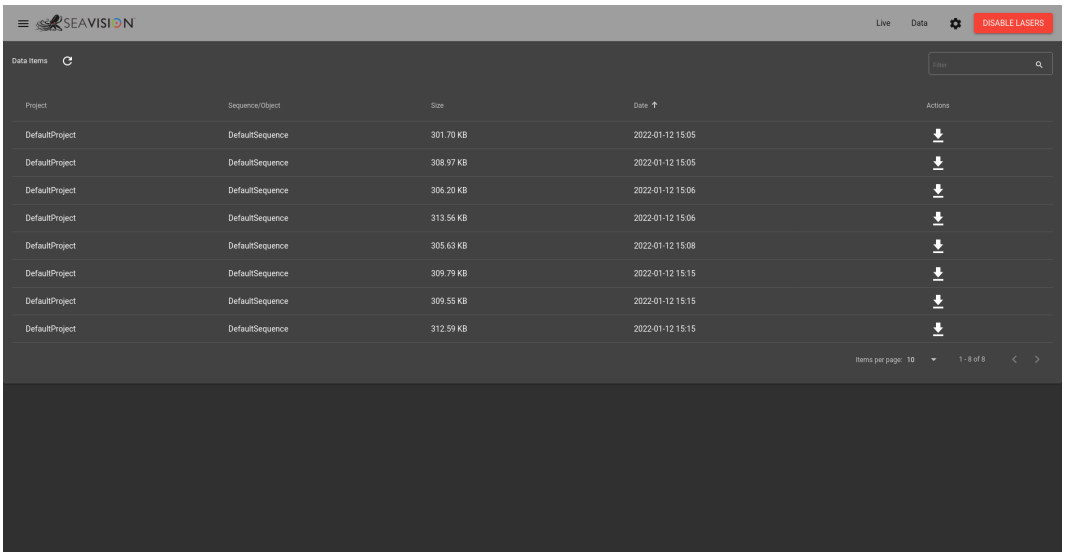


Abbildung 15: SeaVision Web Log-Daten

WP 3.3 Service Algorithms & Pre-Processing

Ziel: Entwurf und Implementierung von Software-Algorithmen für die Verbesserung von Bilddaten erzeugt mit dem SeaVision™ System.

Methodik: Mittels Literaturrecherche Identifikation von Standardverfahren in der Bildverarbeitung, die für Bilddaten vom SeaVisionTM geeignet sind, gefolgt von entsprechenden Test-Implementierungen.

Ergebnis: Die Bilddaten vom einem SeaVisionTM System stehen als sogenannte RAW-Daten zur Verfügung. Das heißt, die Daten werden nach der Digitalisierung weitestgehend ohne Bearbeitung gespeichert. Die Daten beinhalten daher für jeden Sensorpixel einen unabhängigen Messwert ohne Nachbarschaftsbeziehungen zu berücksichtigen. Die Kamera in einem SeaVisionTM System ist zudem eine Farbkamera, dessen Pixels, ähnlich zu einem Schachbrett, mit unterschiedlichen Farbfiltern bedeckt sind, die zu 50 % aus Grün und je 25 % aus Rot und Blau bestehen (**Abbildung 16**).

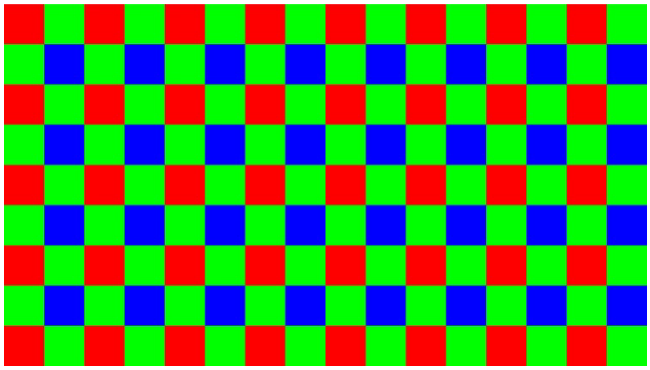


Abbildung 16: Bayer Matrix des SeaVisionTM Kamerasensors.

Für eine entsprechende Anzeige der Bilddaten müssen daher die Raw-Daten in einen anderen Farbraum konvertiert werden, der jedem Pixel eine rekonstruierte Farbe zuweist, die basierend aus den umliegenden Messwerten für die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau berechnet werden kann. Dieses als Entmosaikisierung (demosaicing) bekannte Schritt steht mittels zahlreicher quelloffener Bibliotheken wie zum Beispiel OpenCV oder GStreamer zur Verfügung.

Weitere Standardverfahren zur Verbesserung der Bildqualität können unteranderem in folgende Unterkategorien eingeteilt werden:

- Belichtungskorrektur
- Rauschunterdrückung & Scharfzeichnung
- Farbkorrektur (Tonwertkorrektur / Farbsättigung / Weißabgleich)
- Beseitigung von chromatischer Aberration
- Beseitigung von geometrischen Abbildungsfehlern

Während das SeaVisionTM System einen 3D Scan durchführt, sind die eingebetteten Kameras sowie LEDs so eingestellt, dass das Lasersignal möglichst gut in der Bilddomain erkannt werden kann. Jedoch wird vor jedem Scan ein Bild aufgenommen, um eine spätere Kolorierung der 3D Messpunkte zu ermöglichen. Eine Verbesserung dieser Bilder hat somit direkten Einfluss auf die Qualität der erzeugen farbigen 3D Punktwolken. Die durchgeführte Implementierung verwendet dementsprechend folgende Schritte und Verfahren, um die Bildqualität zu steigern.

Entmosaikisierung:
Im ersten Schritt wird eine Entmosaikisierung durchgeführt, um eine weitere Bearbeitung der Bilddaten zu ermöglichen. Dazu wird die Implementierung von der quelloffenen Bibliothek OpenCV in den SeaVision Software Stack eingebunden.

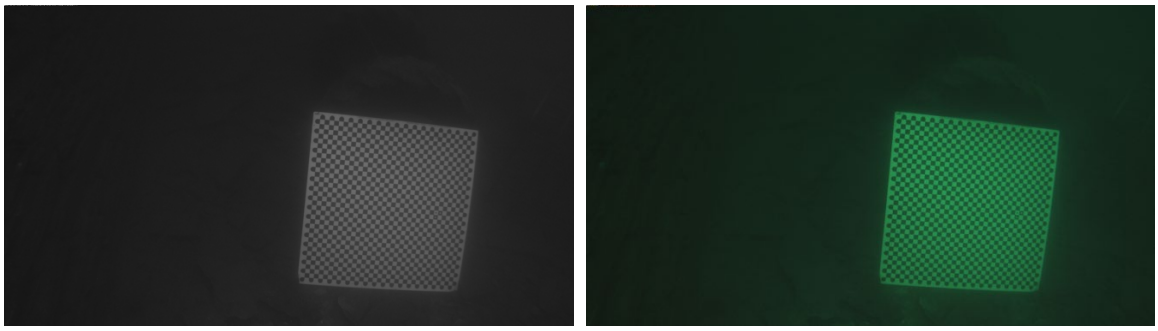


Abbildung 17: Links: Raw-Bild; Rechts: Bild nach der Entmosaikisierung

Stack-Based HDR Imaging:
Die stapelbasierte HDR-Bildgebung (High Dynamic Range) ist eine Technik zur Erzielung eines größeren Dynamikbereichs in einem Bild durch die Kombination mehrerer Bilder mit niedrigem Dynamikbereich, die mit unterschiedlichen Belichtungen aufgenommen wurden [19].

Für die Implementierung von der stapelbasierten HDR-Bildgebung wurde ein neuer Modus für den Kamer-Servicemodule implementiert, der es erlaubt den ISO-Level automatisch weiterzuschalten, sobald ein neues Bild im Speicher ankommt. Damit kann in kurzer Zeit ein Bildstapel aufgenommen werden, der alle verfügbaren ISO-Level abdeckt.

Basierend auf dem Bildstapel werden die einzelnen Bilder gegeneinander ausgerichtet, um kleine Bewegungen vom Sensor auszugleichen. Dazu werden Bildfeatures über dem gesamten Stack verfolgt und die einzelnen Bilder so perspektivische verzerrt, dass die Bilder möglichst deckungsgleich sind.

Anschließend wird ein HDR-Bild generiert, indem die einzelnen Helligkeitswerte eines Pixels über dem gesamten Stack hin aufsummiert werden [19]. Anschließend wird mittels Histogramm Spreizung sowie einem Medianfilters eine Tonwertkorrektur und Rauschunterdrückung durchgeführt.

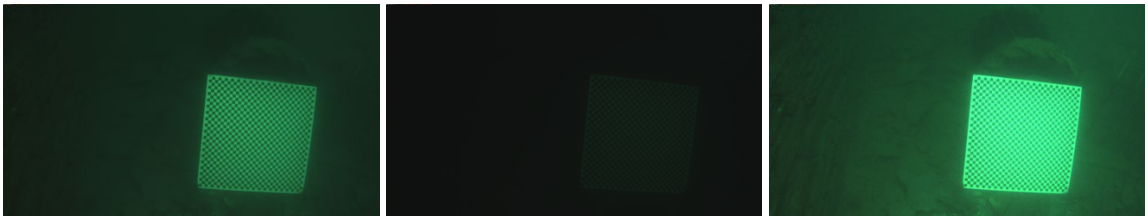


Abbildung 18: Drei Beispiel Bilder von einem Bild-Stack einer Unterwasserscene.

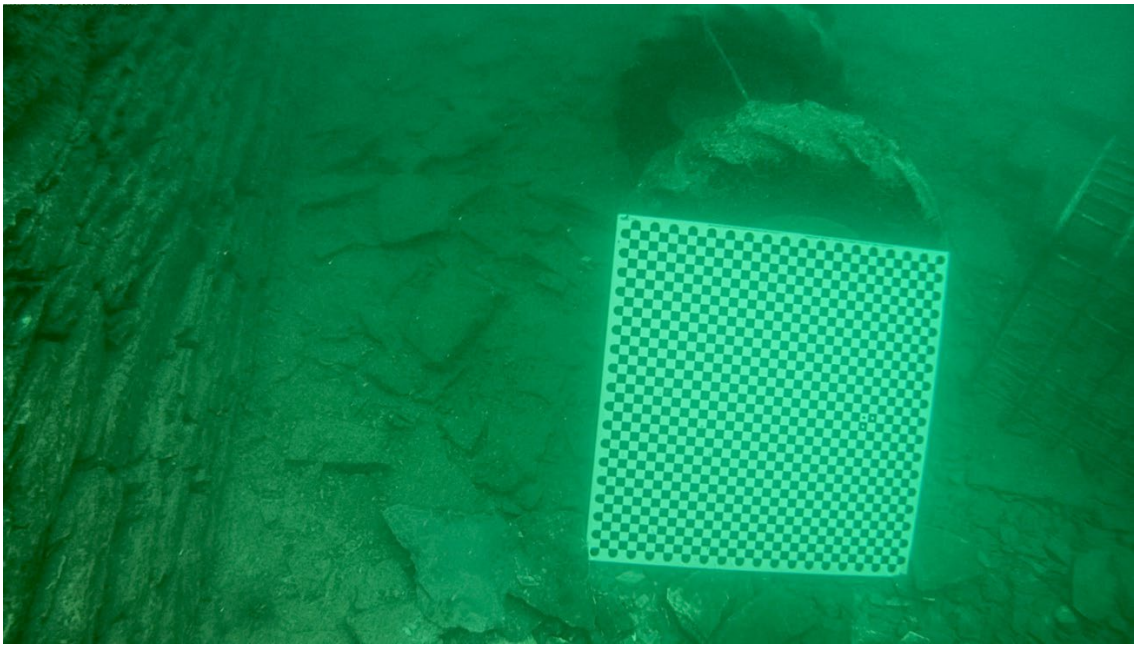


Abbildung 19: HDR-Bild nach der Berechnung

Beseitigung von geometrischen Abbildungsfehlern:
Eine Beseitigung von geometrischen Abbildungsfehlern in der Bildebene ist nicht nötig, da das Bild später auf eine Punktwolke projiziert wird, die schon eine entsprechende geometrische Kompensation durchführt.

WP 4.4 Over- & Underwater Network Integration

Ziel: Einbindung des 3D-Sensors in die Kommunikationsarchitektur. Hierbei gilt es vor allem den potentiell sehr hohen Bedarf an Bandbreite des Sensors zu beachten.

Methodik: Einbindung mittels Web-Technologien mit Unterstützung für dynamische Datenraten.

Ergebnis: Der benötigte Netzwerkdurchsatz von SeaVisionTM für die Übertragung von Steuer- und 2D/3D Sensordaten wurde so angepasst, dass sie flexibel auf den zur Verfügung stehende Datenbandbreite angepasst werden kann. Hierfür wird die Kompressionsstärke vom Sensorsignal automatisch in Echtzeit angepasst indem ein Bi-direktional Datenstrom zwischen Server und Client aufgebaut wird. Damit ist es nun möglich die Paketumlaufzeit zu bestimmen und bei steigender Latenz und sinkenden Durchsatzrate die Kompression entsprechend zu erhöhen.

Im Weiteren wurde das Web-Interface für die Übertragung von 3D Laser-Profilen so erweitert, dass nur eine Teilmenge eines Scans ausgewählt und übertragen werden kann. Das entsprechende Web-Interface ist dazu in **Abbildung 20** dargestellt. Die Integration wurde auf Netzwerk Topologien mit einem Datensatz zwischen 6 und 1000Mbit/sec erfolgreich getestet und kam während der Durchführung von WP 6.2 zum Einsatz.

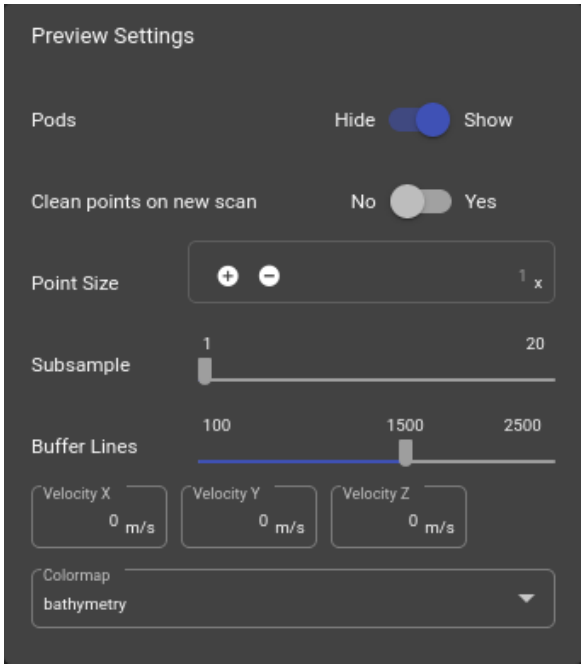


Abbildung 20: Web-Interface für das Sub-Sampeln von Punktwolken auf der Serverseite.

WP 5.2 Unmanned Underwater Vessels (UUVs)

Ziel: Integration des 3D-Sensors in das ROV von MRC.

Ergebnis: Für die Integration von SeaVisionTM in ein ferngesteuertes Unterwasserfahrzeug vom Projektpartner MRC wurden entsprechende Halterungen, Auftriebskörper und Kabelverbindungen entworfen und verbaut, um einen auftriebsneutralen Betrieb zu ermöglichen. Die endgültige Integrationsarbeiten wurden im September 2020 von dem Projektpartner MRC in Limerick durchgeführt, dargestellt in **Abbildung 21**.

Abbildung 21: Integration des 3D-Sensors in das ROV von MRC.

WP 5.3 Underwater Imaging Sensor

Ziel: Entwicklung einer Flachwasser Version von SeaVision™, die Beschleunigung des Scanvorgangs, die Anpassung der Erfassungs- und Nachbearbeitungsalgorithmen sowie umfangreicher Test auf Prüfständen, Testumgebungen und Demonstrationsszenarien.

Methodik: Mittels Literaturrecherche Identifikation von neuen Verfahren für die Beschleunigung des Scanvorgangs, sowie erhöhte Robustheit gegenüber Fremdlicht und Sensorbewegungen mit einer anschließenden Validierung durch Prototypen.

Ergebnis: In dem Arbeitspaket wurden als erstes die Limitierungen vom SeaVisionTM System im Kontext von der Schiffsrumpfinspektionen analysiert, um durch entsprechende Weiterentwicklungen in Software und Hardware eine Performancesteigerung zu erzielen. Dabei wurden insbesondere die beiden Bereiche Fremdlicht durch Sonnenlicht bzw. Scheinwerferlicht und relative Sensorbewegung zwischen Schiffsrumpf und Sensor als kritisch eingestuft.

Kompensation schmalbandiges Fremdlicht:
Fremdlicht erscheint im Kamerabild als zusätzliches Störsignal und reduziert den Signal-Rausch-Abstand was zu einer verringerten Leistung des Gesamtsystems führt. Falls das Fremdlicht ausschließlich aus einer bestimmten Wellenlänge besteht, kann der Effekt auf das System nahezu vollständig kompensiert werden, wenn die Kamera dabei in ihrem linearen Bereich betrieben wird. Dazu wird basierend auf den drei Farbkanälen der Kamera die relative Stärke des Fremdlicht geschätzt und von dem Farbkanal, der für die Lasermessung verwendet wird, entfernt. Dies bietet zwar keinen Vorteil gegenüber breitbandigen Fremdlicht, wie bei Sonnenlicht. Jedoch kann so die Scene zum Beispiel mit einem roten Licht ausgeleuchtet werden, während mit einem grünen Laser gescannt wird. Basierend auf dem roten Kanal kann dann anschließend eine entsprechende visuelle Bewegungskompensation durchgeführt werden, ohne den eigentlichen Scan-Prozess zu beeinträchtigen. Abbildung 22 zeigt die verwendete spektrale Response-Kurven der verwendeten Sensoren und deren jeweiligen Bayer Feldern. Hier kann für schmalbandige Lichtquellen ein lineares Verhältnis zwischen den Kanälen festgestellt werden, dass so wieder zur Rückrechnung des Ursprungssignals verwendet werden kann.

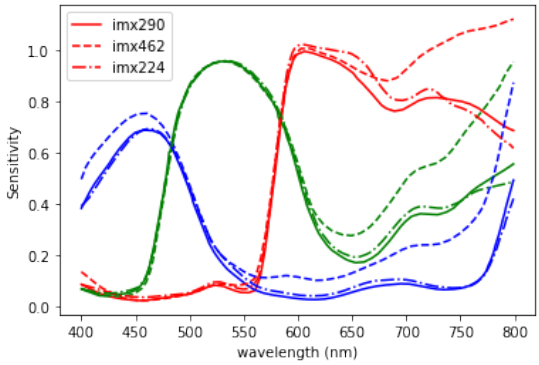


Abbildung 22: Spektrale Response der verwendeten bildgebenden Sensoren

Das oben beschriebene Verfahren wurde in den SeaVision Software-Stack integriert und steht für die nachträgliche Prozessierung von Sensordaten zur Verfügung. Beispieldaten sind in Abbildung 23 dargestellt bei denen die Umgebung mit rotem Licht beleuchtet wurde. Dadurch ergeben sich beim Standardverfahren zum Teil größere Messlücken, da der Laser abhängig von der Umgebung, nicht eindeutig in der Bildebene identifiziert werden kann. Durch die Fremdlichtkompensation können diese Lücken erfolgreich geschlossen werden. Abbildung 24 zeigt wie durch das Verfahren eine eindeutige Trennung der ursprünglichen Lichtsignale möglich ist.

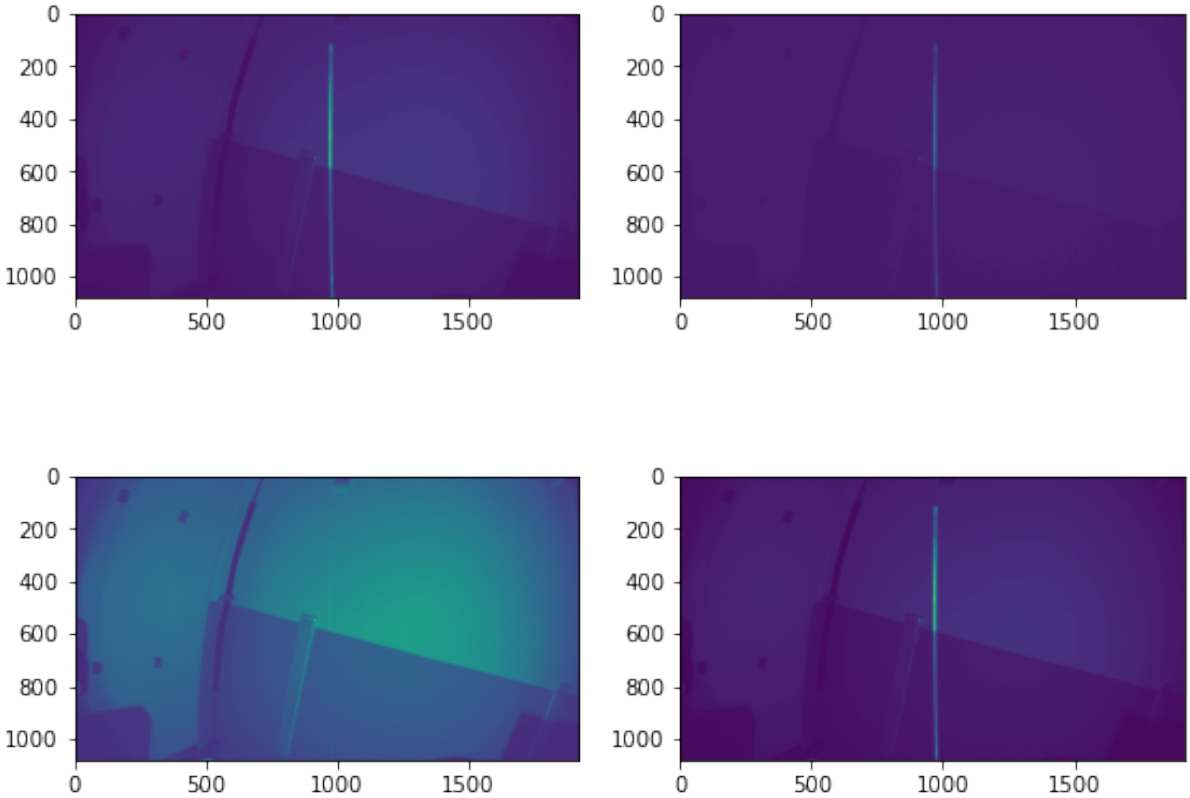


Abbildung 23: Testbild mit grünem Laser und rotem LED licht, aufgeteilt auf die jeweiligen Bayer felder. Rot (links-unten), Blue (rechts-oben), sowie Grün.

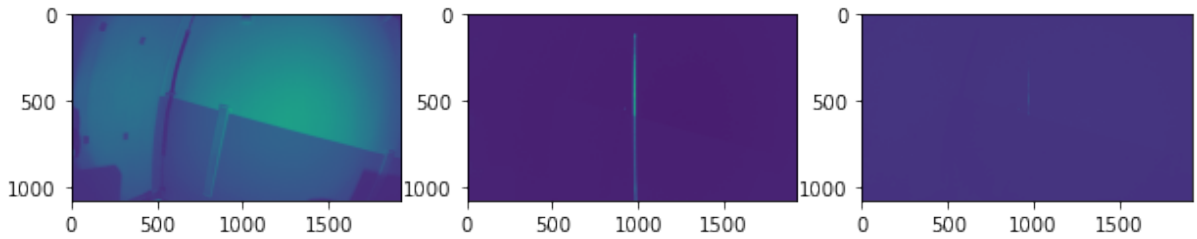


Abbildung 24: Aufspaltung der Farbkanäle nach Wellenlänge der Lichtquellen. Links: rote LED, mitte: grüner Laser, rechts: blaue Referenz.

Kompensation breitbandiges Fremdlicht:
Für eine Verbesserung der Lasererkennung im Flachwasser bei direktem oder indirektem Sonnenlicht wurde zusätzlich ein neuartiger Laserprojektor entwickelt, der mögliches Umgebungslicht in Kombination mit einer entsprechenden Kamera bei direktem Sonnenlicht im flachen Wasser eingesetzt werden kann ohne dass der Sensor in die Sättigung geht.

Voruntersuchungen haben dabei ergeben, dass durch eine Fokussierung der zur Verfügung stehenden optischen Energie das Signal in Situationen mit starkem Umgebungslicht um einen Faktor 10-30 angehoben werden kann, ohne dabei die Scangeschwindigkeit zu beeinflussen. Zusammen mit anderen Verfahren, wie zum Beispiel optischen Bandpassfiltern, ist so eine kombinierte Verstärkung um einen Faktor 100 zu dem jetzigen System realisierbar, was eine weitestgehend Toleranz gegenüber direktem Sonnenlicht gewährleistet

Das Verfahren ist von den Arbeiten in [20] inspiriert, verwendet jedoch anstelle eines MEMS Projektor einen Polygonspiegel für die Laserablenkung. Im Wesentlichen basiert das Verfahren dabei darauf, dass das Laserlicht mit dem Rolling-Shutter einer Kamera synchronisiert wird. Hierdurch kann die Laserlinie durch einen schnell bewegten Laserpunkt erzeugt werden, ohne dass die Helligkeit der erzeugten Linie im Bildbereich abnimmt. Da nun zu einem bestimmten Zeitpunkt nur noch wenige Zeilen vom Bild von dem Laserpunkt getroffen werden, kann zu dem das Rolling-Shutter-Fenster entsprechend verkleinert werden, wodurch das gemessene Umgebungslicht gedämpft wird. Das neue Verfahren besitzt damit folgende Vorteile gegenüber Standardverfahren:

- Einfachere Kalibrierung und größere Fertigungstoleranzen im Vergleich zu Standard Laser-Scannern basierend auf Linienkameras und Punktlasern.
- Hohe Toleranz gegenüber Schwankungen in der Synchronisierung, da die Tiefenmessung orthogonal zur Scanrichtung durchgeführt wird.
- Kostengünstigere Produktion, durch die Verwendung von Standardkomponenten.
- Reduzierte Signalrückstreuung durch Minimierung des gleichzeitig beleuchteten gemeinsamen Volumens zwischen Kamera und Laser im Vergleich zu einem Linienlaser.
- Starke Reduzierung des Rauschsignals bei gleichbleibender Laserklasse / Gefahrenstufe für das menschliche Auge im Vergleich zum Linienlaser.
- Einsatzfähigkeit bei direktem Sonnenlicht in flachen Gewässern

Die Entwicklung des Prototyps beinhaltete dabei folgenden Komponenten, die im Rahmen von WP 5.2 entwickelt worden sind, sowie die Evaluation an Luft und in Wassertanks. Ein Überblick über die einzelnen Komponenten ist in **Abbildung 25** dargestellt.

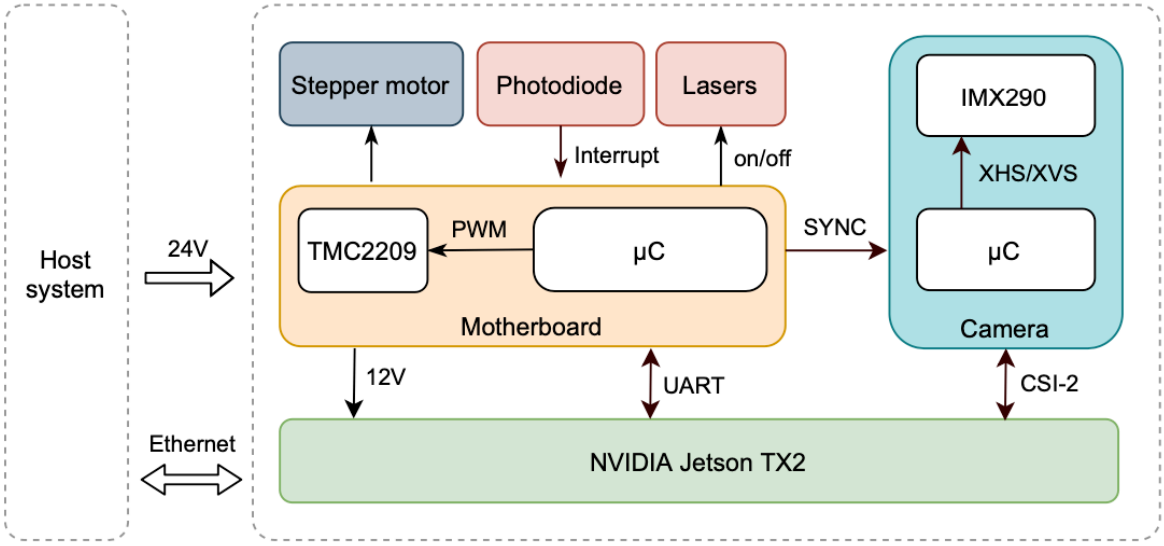


Abbildung 25: Komponenten des Prototypens.

Kameramodule
Die entwickelte Steuerplatine für einen Kamerasensor, erlaubt es den elektronischen Verschluss der Kamera mit einem externen Polygonspiegel auf mehrere Micro-Sekunden genau zu synchronisieren (Phase Locked Loop). Dazu wird das HSync und VSync Signal für den Kamerasensors von der Steuerplatine mittels eines Micro-Controllers erzeugt. Die Konfiguration der Steuerplatine und Sensors erfolgt dabei über I2C (CSI-2).

Die Platine für die Steuereinheit wurde von einem externen Dienstleister entsprechend den erstellten Produktionszeichnungen produziert. Die Bestückung der Platine wurde von der Kraken Robotik GmbH selbst durchgeführt und ist in **Abbildung 26** und **Abbildung 27** dargestellt.

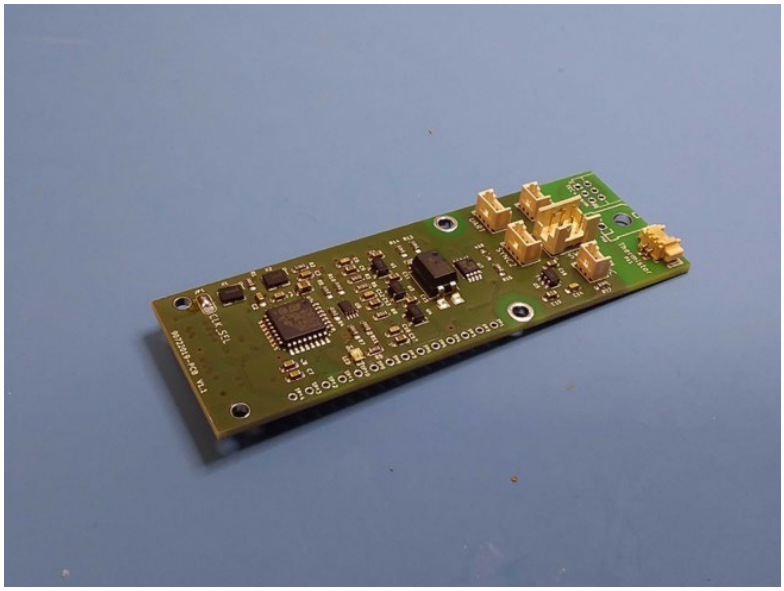


Abbildung 26: Bestückte Steuerplatine für den Kamerasensor

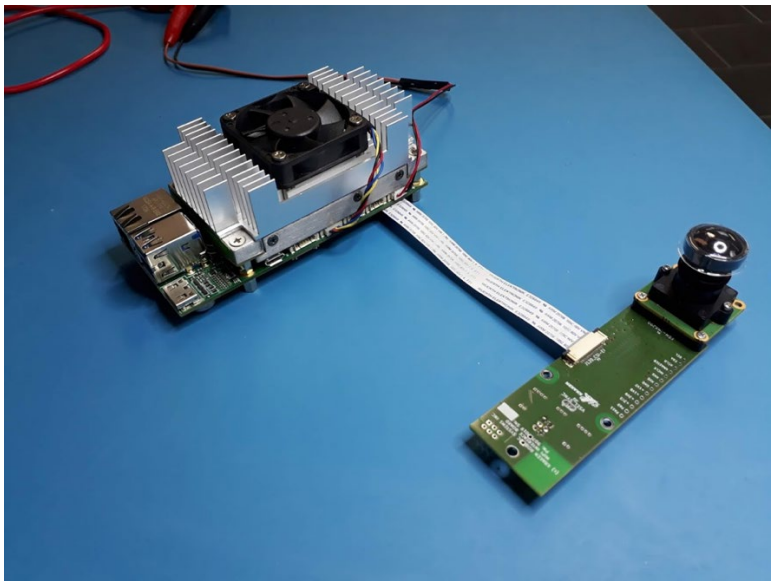


Abbildung 27: Kamera Steuerplatine Verbunden mit dem Embedded-PC.

Ein Standardkameraobjektiv wies dabei eine zu starke Verzeichnung auf als das eine entsprechende Synchronisation durchgeführt werden kann, da nicht bekannt ist in welcher Spalte der Laser auftreffen wird. Um eine möglichst genaue Zeilensynchronisation durchzuführen zu können wurde daher auf ein Objektiv mit geringer Verzeichnung zurückgegriffen. Die gemessene Verzeichnung von beiden Objektiven ist dabei in **Abbildung 28** und **Abbildung 29** dargestellt.

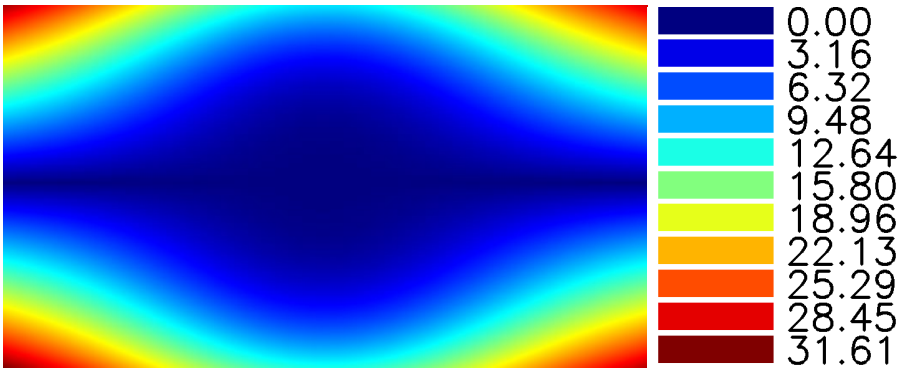


Abbildung 28: Verzeichnung in Pixel einer Standardlinse

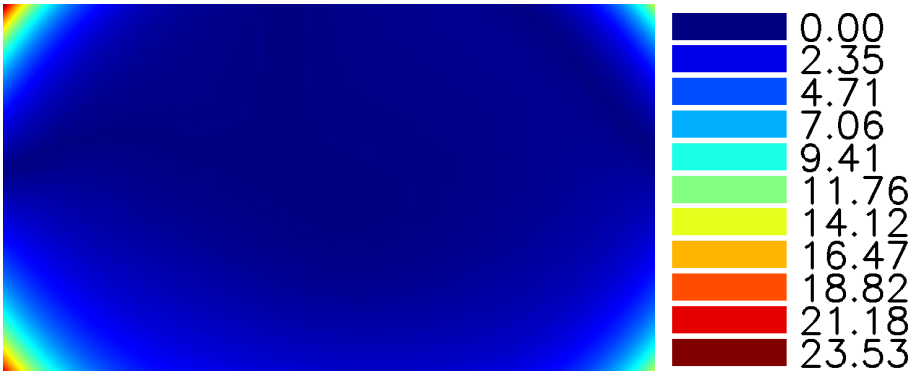


Abbildung 29: Verzeichnung in Pixel einer Speziallinse

Firmware für das Kameramodule
Die Steuerplatine beinhaltet einen STM32 Micro-Controller der folgenden Aufgaben erfüllen muss:

- Erzeugung von Steuersignale für den Kamerasensor (HSync / VSync)
- Schalten der Stromversorgung für den Kamerasensor
- Synchronisation der internen Uhr mit einer externen Uhr mittels PPS
- Kommunikation mit dem Embedded-PC mittels I2C
- Überwachung des Kamerasensors

Für die Implementierung der Firmware wurde auf die Hardware Abstraktionsschicht HAL und das Echtzeitbetriebssystem FreeRTOS zurückgegriffen. Für den Betrieb ist die Steuerplatine mit dem Embedded-PC, dargestellt in **Abbildung 27**, über ein Flachbandkabel verbunden, das der MIPI-Spezifikation entspricht und neben den Sensordatenleitungen auch einen I2C-Bus für die Steuerung beinhaltet. Die Steuerplatine ist dabei neben dem Kamerasensor als zusätzlich Gerät am I2C-Bus des Embedded-PCs angeschlossen. Zusätzlich beinhaltet die Steuerplatine eine zusätzliches I2C Chip, der es ermöglicht den Micro Controller in den Programmiermodus zu versetzen, um ihn über den I2C-Bus vom Embedded-PC aus zu programmieren.

Kamera Treiber
Die Softwareeinbindung der Kamera an den Embedded-PC erfolgt über die Video4Linux Schnittstelle. Dazu wurde ein entsprechendes Linux-Kernel Module implementiert, dass den ausgewählten Kamerachip unterstützt und je nach Betriebsmodus die Steuerplatine entsprechend konfiguriert. Die Anbindung in den SeaVision-Softwarestack erfolgt über das quelloffene Multimedia-Framework GStreamer, dass als Back-End für die Berechnung der Lasertriangulation auf GPU Ebene verantwortlich ist. Der SeaVision Kameradienst verwendet dabei das Plug-In System vom GStreamer, um das neue Kameramodule alternative zu der aktuellen Kamera ansprechen zu können, ohne gegen den neue Kamera-Treiber linken zu müssen.

Polygon-Spiegel für die Laserablenkung
Für die Laser-Synchronisation wird ein Polygonspiegel benötigt, der zunächst aus Plastikspiegelfacetten und 3D Druckteilen erstellt wurde. Für eine genauere Systemanalyse wurde im nächsten Schritt versucht einen entsprechenden Spiegel extern fräsen zu lassen. Die Kosten hierfür waren jedoch nicht im Materialbudget eingeplant. Es wurde daher ein Polygonspiegel aus einem Laser-Drucker verwendet und entsprechend modifiziert, so dass er ohne große Einschränkungen im Prototype verwendet werden konnte. Der entsprechende Polygonspiegel zusammen mit der Originalsteuereinheit ist in **Abbildung 30** dargestellt.

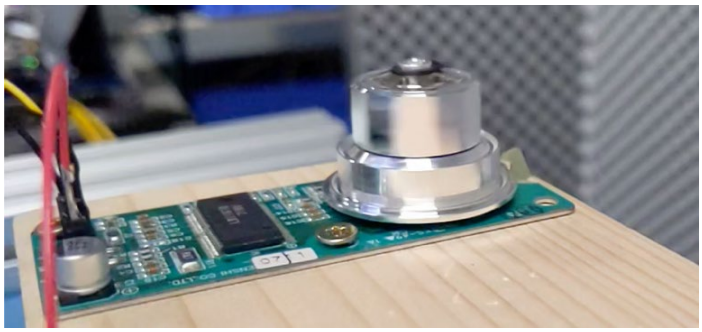


Abbildung 30: Polygon Spiegel von einem Laser-Drucker

Die Originalsteuereinheit konnte dabei nicht verwendet werden, da sie nicht mit der Kamera gekoppelt werden konnte. Daher wurde der Spiegel auf einem Stepper-Motor montieret und die Synchronisation über eine Photozelle realisiert, die jeweils vom Laser überstrichen wird, wenn sich der Spiegel um eine Facette weitergedreht hat (**Abbildung 31**).

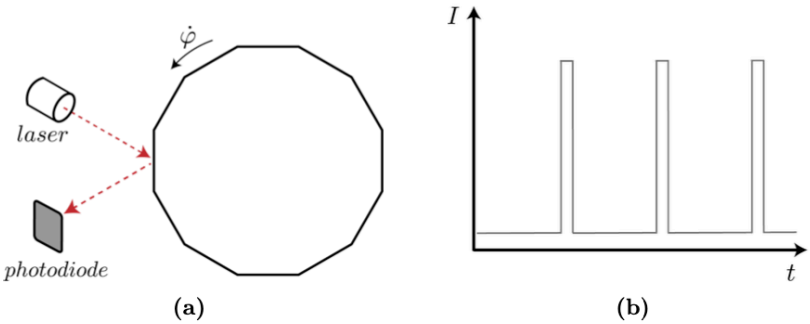


Abbildung 31: Polygonspiegel Synchronisation mittels Start-of-Scan (SOS) Sensors. a) Mechanische Anordnung; b) Messsignal bei Drehung des Spiegels.

Alle Komponenten bestehend aus, Kamera, Laser, Motor, Polygon Spiegeln und Steuerelektronik für die Synchronisierung wurden in ein 3D gedrucktes Gehäuse integriert, um Versuche an der Luft und im Wasser durchführen zu können. Für die Unterwasserversuche wurde dabei ein Aquarium verwendet, wo die Glasscheibe vom Aquarium äquivalent zu der Glasscheibe des späteren Unterwassergehäuses angesehen werden kann. Der schematische Aufbau ist in **Abbildung 32** dargestellt und der fertige Prototype ist in **Abbildung 33** abgebildet.

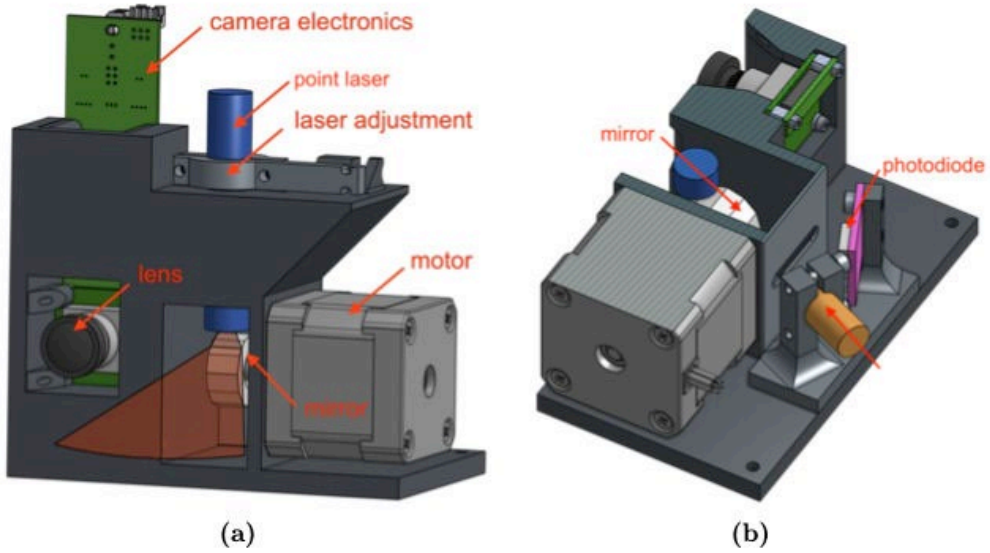


Abbildung 32: Schematischer Aufbau der Laserprojektionseinheit, die synchron zur integrierten Kamera betrieben wird.

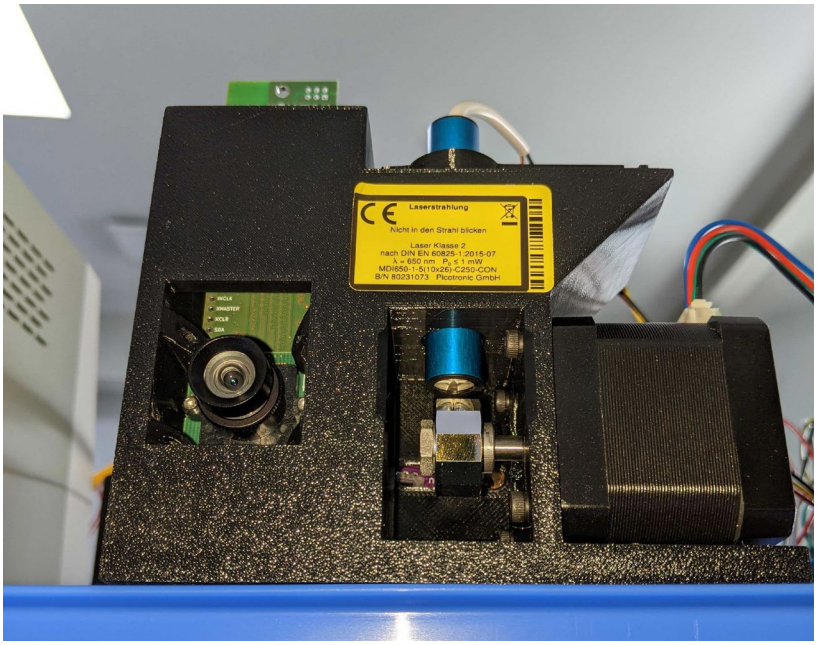


Abbildung 33: Integrierter Prototype der neuen Laserprojektionseinheit

Evaluation der Projektionseinheit

Für die Evaluierung der neuartigen Laserprojektionseinheit wurde ein Testaufbau erstellt bei dem das System vor einem Aquarium gefüllt mit Wasser platziert wurde. Das Aquarium konnte unterschiedlich beleuchtet werden und die Trübung verändert werden.

Bei den Messungen konnte gezeigt werden, dass eine Zeitsynchronisierung zwischen Kamera und Laser mit einer Genauigkeit von +/- 150 Mikrosekunden ausreicht, was relativ einfach durch Standardelektronik abgebildet werden kann. Zudem konnte das System ohne aufwendige

Ausrichtung zwischen Laser und Kamera eingesetzt werden, da bei üblichen Fertigungstoleranzen eine elektronisch kompensiert erfolgen konnte. Im Vergleich zu triangulationsbasierten Systemen mit Linienkamera können dadurch erheblich Einsparung in der Fertigung erzieht werden.

Die Umgebungslichtdämpfung bei gleichbleibender Helligkeit der Laser Line wurde mit 26 dB gemessen, dargestellt in **Abbildung 34**. Dies entspricht einer äquivalenten Laserleistungssteigerung eines SeaVisionTM Laser von 0.070 Watt auf 1.4 Watt. In Kombination mit einem optionalen optischen Bandpassfilter ergibt sich hiermit eine Gesamtdämpfung von etwa 40dB wodurch das System in direktem Sonnenlicht eingesetzt werden könnte.

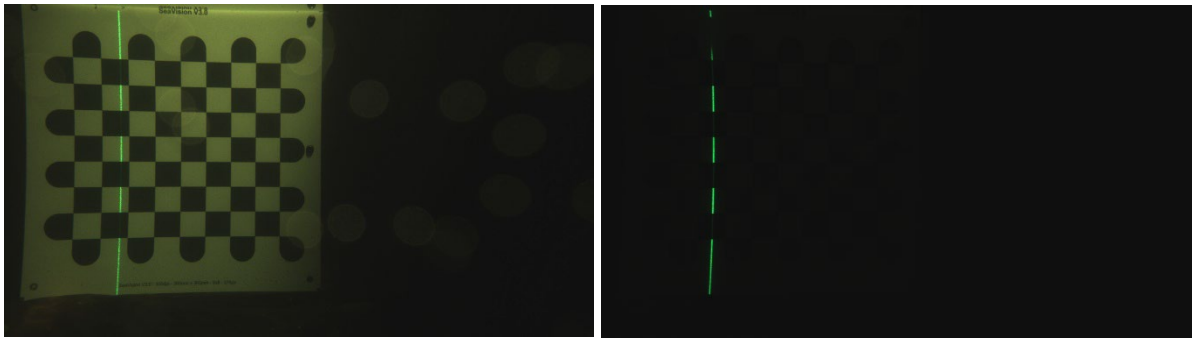


Abbildung 34: Kamerabild ohne (links) und mit Umgebungslicht Unterdrückung (rechts) mittels Rolling-Shutter Synchronisation.

Das verwendete Rolling-Shutter Fenster der Kamera musste dabei mindestens 20 Zeilen umfassen damit der Laser für das gesamte Bild in den Shutter fällt. Ursache sind Verzeichnung und Ausrichtungsfehler, die eine Spalten- und Zeilenabhängigkeit erzeugen, dargestellt in **Abbildung 35**.

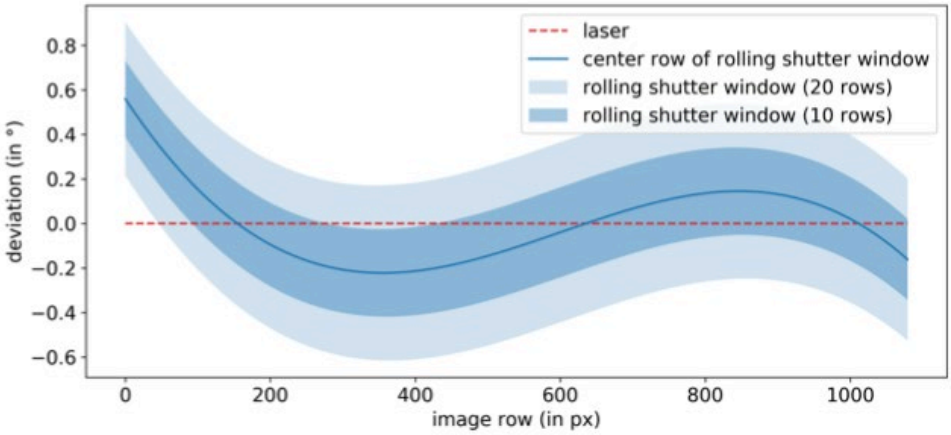


Abbildung 35: Abweichungsfehler zwischen dem Laser und dem Rolling-Shutter.

Hardwareeinbindung in eine SeaVisionTM Einheit

Die Hardwareeinbindung der neuen Laser Projektionseinheit in einen Standard-SeaVision Unit wurden vorbereitet, konnten jedoch nicht vollständig abgeschlossen werden. Das Kameramodule, dargestellt in **Abbildung 36**, wurde entsprechend der Konstruktionszeichnungen, dargestellt in **Abbildung 37**, in eine SeaVision Unit eingebaut. Der Glaszylinder einer SeaVision Unit muss aber um 90° gedreht werden, um eine Triangulation zu ermöglichen. Dies Veränderung benötigen ein

vollständiges Re-Design des unteren SeaVision Kompartiments. Es wurde daher auf eine Integration in eine Standard-SeaVision Einheit verzichtet, um mit den entwickelten Prototypen zunächst eine Vollständige Kosten-Nutzen-Abschätzung durchführen zu können.

Abbildung 36: Kameramodule bestehenden aus Steuerplatine, Sensor und Objektiv für die Integration in eine SeaVision Einheit.

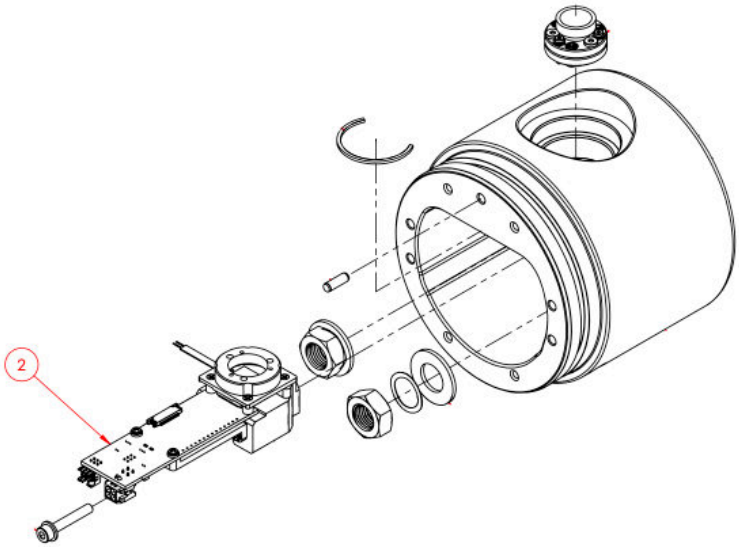


Abbildung 37: Integration des Kameramodules 2 in den Kopf einer SeaVision Einheit

Beschleunigung des Scan-Vorgangs:
Die Scan Geschwindigkeit hängt bei der Standard-SeaVision Einheit von der maximalen Aufnahmegeschwindigkeit der eingebauten Kamera ab. Im idealen Fall existiert dabei für jeden Bildpunkt eine entsprechende Aufnahme, bei der der Laser genau auf diesen Pixel abgebildet wird. Dies begrenzt die Scangeschwindigkeit von SeaVision auf rund 0.1Hz für einen 3D-Scan mit voller Auflösung.

Für eine Beschleunigung eines 3D-Scans, wurde daher ein neues Verfahren implementiert, dass die Berechnung vom Bildbereich (Ortsbereich) in den Zeitbereich verschiebt. Dadurch wird nicht mehr in jedem Bild die Laserposition extrahiert, sondern mittels eines Bildstapels für jeden Pixel geschätzt, wann der Laser auf den Pixel abgebildet wurde. Wird nun eine leicht unscharfe Laserlinie verwendet, kann die Scan-Geschwindigkeit um die halbe Pixelbreite der Laserlinie erhöht werden. Insbesondere bei leichter Trübung kann so die entstehende Unschärfe der Laserlinie für eine genauer und eine 3-5-mal schnellere Messung verwendet werden. In

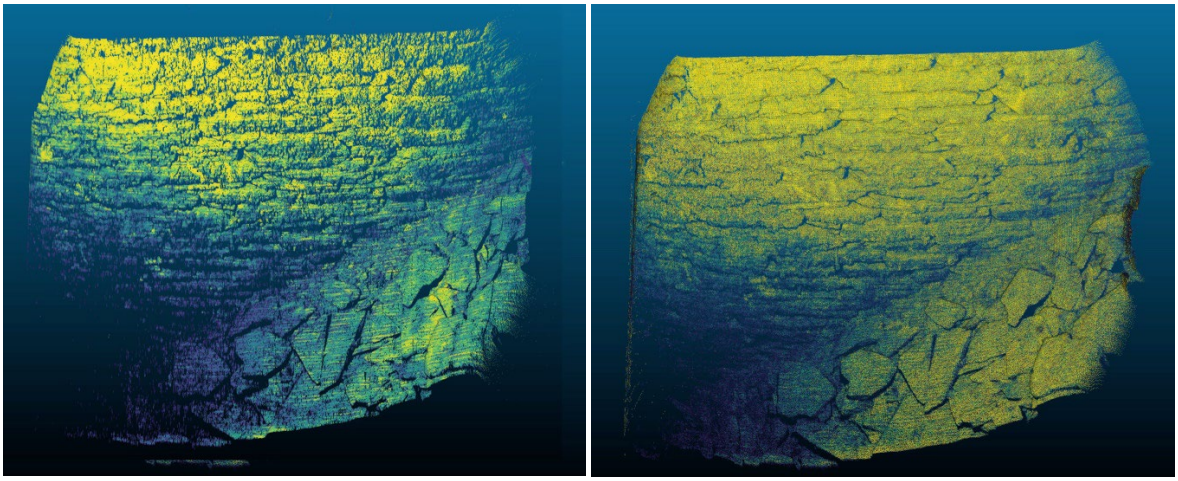


Abbildung 38: Sieben Sekunden 3D-Scan mit Standard-Verfahren (links) und 2 Sekunden 3D-Scan mit dem neuem Verfahren (rechts) von einer Unterwasserwand.

Das neue Verfahren setzt aktuell eine statische Scene voraus, um es auch bei Sensor-Bewegung einsetzen zu können, muss eine entsprechende Bewegungskompensation durchgeführt werden. Das neue Verfahren ist hierbei Prinzip beding empfindlicher auf schnelle Bewegung als das Standardverfahren, kann jedoch bei milder Bewegung kompensiert werden.

Bewegungskompensation:
Bei der optischen Stabilisierung ist das Ziel jegliche Bewegung des Sensors während eines Scan-Vorgangs im Sub-Millimeter Bereich zu detektieren und zu kompensieren, um Bewegungsartefakte in 3D Scans zu beseitigen. Hier hat sich gezeigt, dass es im Wesentlichen drei unterschiedlich Fälle von Sensor-Bewegungen gibt, die verschieden Kompensierungen benötigen.

a) Rein rotatorische Bewegungen
b) Translatorische Bewegungen mit geringer Parallax mit oder ohne überlagerten rotatorischen Bewegungen.
c) Translatorische Bewegungen mit ausreichend Parallax mit oder ohne überlagerten rotatorischen Bewegungen.

In den ersten beiden Fällen liegt ein klassisches Initialisierungsproblem von Monocular Kamerasystemen vor. Eine Analyse über vorhandene Scan-Data hat ergeben, dass Fall a) relative selten auftritt und mit der Hilfe von reduzierten Modelparameter gelöst werden kann. Wohingegen Fall b) relative häufig auftritt und eine genaue Bewegungsschätzung unmöglich ist ohne weitere Annahmen über die Umgebung zu treffen. Im Kontext von SeaVision kann mit der Hilfe des Lasersystems zwar zusätzliche Tiefenmessungen entlang von 3D-Profiles für die Initialisierung hinzugezogen werden, jedoch ist die Sensor-Bewegung zwischen den einzelnen 3D Profilen

unbekannt. Diese muss aber zwingend mit geeigneten Werten initialisiert werden, um eine Optimierung der Modelparameter zu ermöglichen.

Im Fall b) ist daher aktuell keine genaue Bewegungsschätzung möglich, jedoch wurden folgende weitere Lösungsansätze verfolgt:

- Es wird von einer reinen Rotation ausgegangen. Ein entsprechender Algorithm berechnet, die maximale erlaubte Translation in der Bildebene bei der noch zu erwarten ist, dass die Optimierung zum globalen Minimum konvergiert. 3D Scans außerhalb diesen Bereichs werden während des Scan-Vorgangs als ungültig markiert.
- Vor jedem Scan wird eine entsprechen translatorische Bewegung durchgeführt die automatisch Fall b) in Fall c) überführt.

Im Fall c) ist eine Bewegungsschätzung mit Standard Methoden aus dem Bereich Photogrammetry möglich und wurde erfolgreich mit der Hilfe der beiden Software Programmen RealtyCapture und Metashape getestet. Hierfür wurde die Kamerabewegung von den externen Programmen berechnet und als Initialisierung für eine weitere Optimierung verwendet, die sowohl Lichtbrechung an Unterwasser-Kameragehäusen als auch die 3D Profile von dem Lasersystem berücksichtig, dargestellt in **Abbildung 39**. Hierdurch ist es möglich hochauflösende und bewegungskompensierte 3D Scans zu erzeugen.

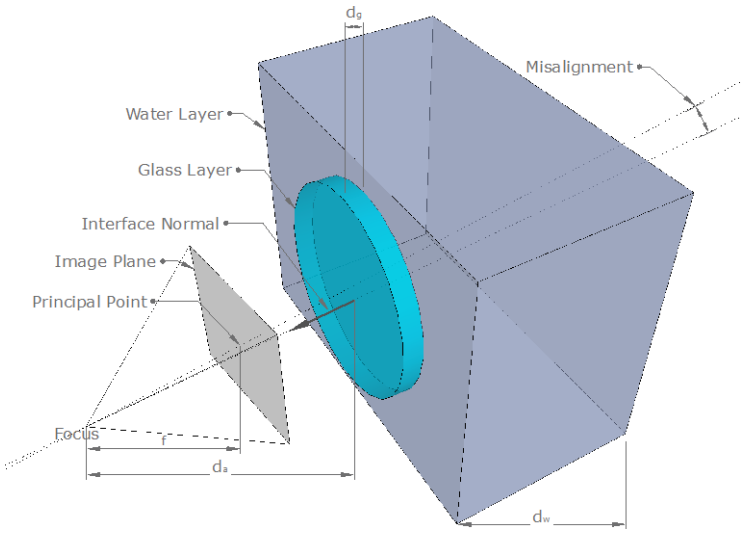


Abbildung 39: Model einer Unterwasser-Flat-Port-Kamera.

Für die Implementierung in den SeaVision Software-Stack werden Sensor Daten (Bilder) mit niedriger Frequenz während eines Laser-Scans ausgekoppelt und über ein Software API an das kommerzielle Softwareprogramm Metashape weitergeleitet. Metashape berechnet anschließend basierend auf Bildmerkmalen die Bewegung des Sensors und übergibt diese Daten zusammen mit Informationen über die Position der verwendeten Bildmerkmale wieder zurück an den SeaVision Software-Stack. Nach der Übergabe, fusioniert SeaVision die Daten mit 3D Lasermessungen und korrigiert die noch unbekannte Skalierung der Bewegungsschätzung sowie entfernt geometrische Verzerrungen aufgrund von Lichtbrechungen am Übergang zwischen dem Glass des Kameragehäuses und dem Medium Wasser.

Der Implementierte Algorithmus für Profiler-Daten (Laserwinkel ist fest) und Dynamischen Scans (Laserwinkel ist variable) ist in **Abbildung 40** dargestellt. Dabei beinhaltend der Block SFM die oben erwähnte Bewegungsberechnung mittels Agisoft Metashape.

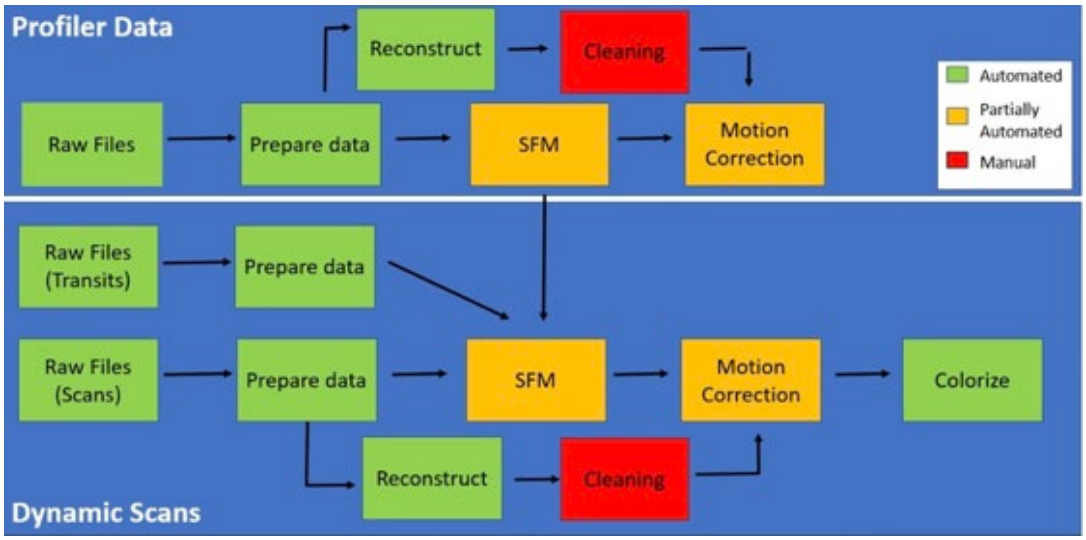


Abbildung 40: Programmfluss für die Bewegungskompensation von 3D Scans.

Die implementierte optische Stabilisierung während des Scan-Vorgangs wurde erfolgreich auf dem Datensatz, der zusammen mit dem Projektpartner Centre for Robotics & Intelligent Systems (CRIS) während Versuchen in Irland entstanden sind, getestet. Die Rekonstruktion eines versunkenem Motorbootes ist in **Abbildung 41** dargestellt. Der Scan erfolgte dabei aus der Wassersäule heraus unter dem Einfluss von Eigenbewegung. Die Bewegung konnte dabei erfolgreich berechnet werden und in dem 3D-Scan kompensiert werden.

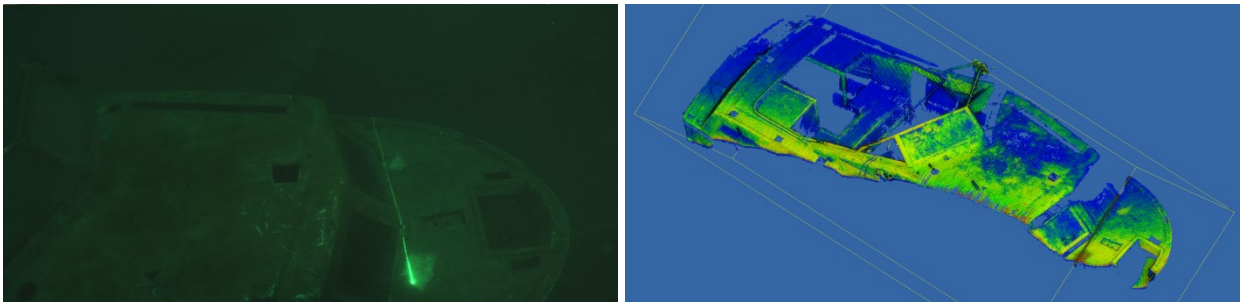


Abbildung 41: 3D Scan von einem versunkenen Motorboot. Links: Kamerabild, Rechts: 3D Rekonstruktion erstellt mittels der Schätzung der Eigenbewegung sowie deren Kompensation.

WP 6.1 Virtual Full-Scale Simulations

Ziel: Simulation des 3D-Sensors auf Basis synthetischer Daten

Ergebnis: Für eine Simulation des 3D-Sensors basierenden auf synthetischem Daten müssen die Kamerabilder inklusive der Laserlinie simuliert werden. Hier wurden in enger Zusammenarbeit die Ergebnisse aus dem Projekt ARIM (FKZ 03SX464A) zur Simulation des SeaVision Systems übernommen und für die Anwendung im RoboVaaS Projekt angepasst.

Dazu wurde der quelloffene Simulator Gazebo so angepasst, dass eine entsprechende Laser Linie auf die Szene projiziert werden kann. Besonderes Augenmerk lag dabei auf dem Laser-Profile, um es möglichst einer Gauß Verteilung einer echten Laserquelle nachzuempfinden und damit eine genaue Sub-Pixel Lokalisierung in der Bildebene, identisch zum echten Sensor, zu ermöglichen.

Durch das Erstellen einer 3D Szene mit Gazebo oder anderen 3D Grafiken Programmen können somit effizient synthetische Daten erzeugt werden, die anschließend dem SeaVision Software-Stack zu gespielt werden. Den nachgeschalteten Algorithmen ist es dabei nicht bekannt, ob die Daten von einer Virtuellen, oder einer echten Kamera stammen. Für die Steuerung der Laser-Linie wurde zudem des Interface des Micro-Controllers nachempfunden, um eine transparente Simulation von 3D-Scans mittels synthetischer Daten zu ermöglichen. Die Simulationsumgebung und ein Beispielbild der virtuellen Kamera sind in **Abbildung 42** dargestellt.

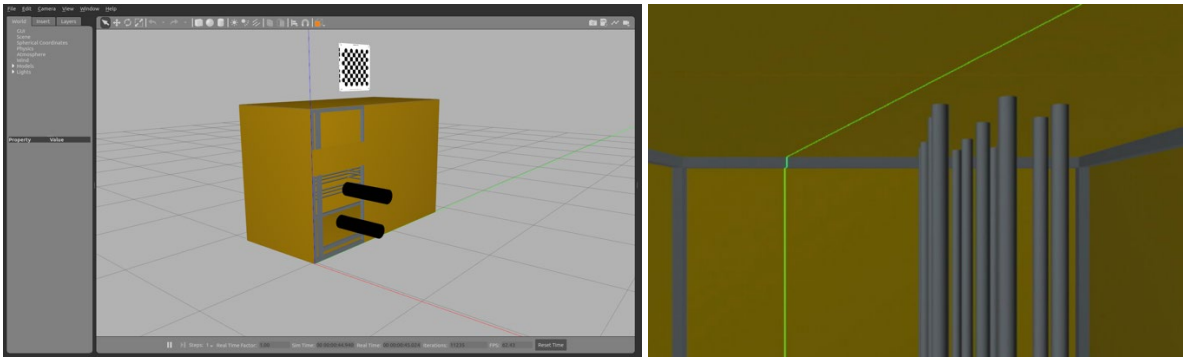


Abbildung 42: Simulation des 3D-Sensors: Links 3D Scene von einer Unterwasserinfrastruktur dargestellt in Gazeboo. Rechts simuliertes Kamerabild inklusive Laserlinie.

WP 6.2 Real large-Scale Operations

Ziel: Durchführung von Unterwasserinspektionen mit dem ROV von MRC und dem SeaVisionTM von der Kraken Robotik GmbH von Schiffsrümpfen und Spundwänden.

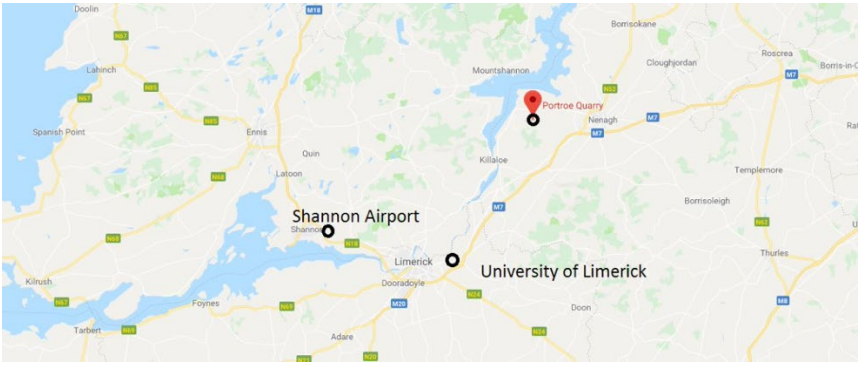


Abbildung 43: Testumgebung, 40 Minuten nördlich von der Universität von Limerick, Irland [21].

Abbildung 44: Luftaufnahme der Testumgebung nördlich von Limerick.

Im Rahmen von WP6.2 wurde zusammen mit mehreren Projektpartnern zwischen dem 14.09.2020 und 18.09.2020 in einem See nördlich von Limerick, Irland (**Abbildung 43** und **Abbildung 44**) mehre Unterwasserversuche durchgeführt. Dies beinhaltete Testdaten für die folgenden Szenarien:

- Inspektion von Spundwänden mittels statischer Laser-Systemen
- Inspektion von Schiffsrümpfen
- Bewegungskompensation von 3D Scans
- Reichweitentests

Für die Versuche wurde der in WP 5.2 modifizierte Unterwasserroboter vom Projektpartner MRC verwendet, dargestellt in **Abbildung 45**. Als Primärsensor kam dabei der SeaVisionTM Unterwasser Scanner zum Einsatz, der über ein Unterwasserkabel mit dem Steuereinheit an Land verbunden war.

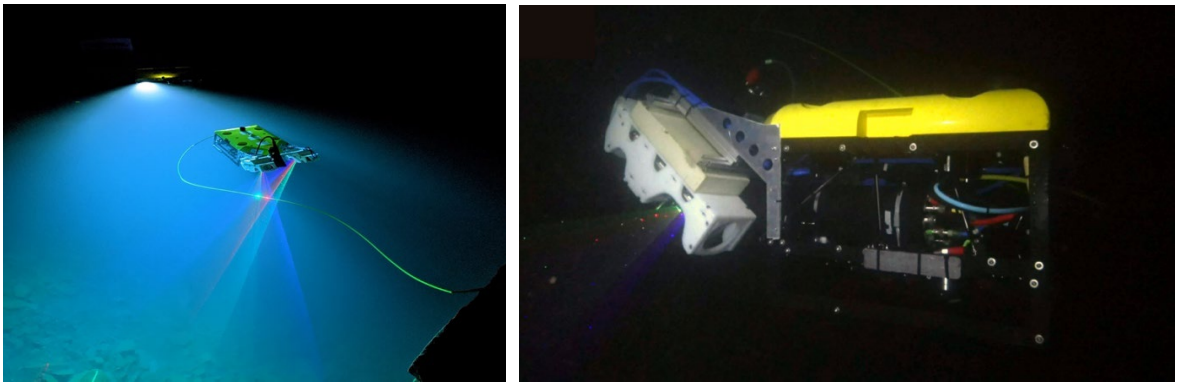


Abbildung 45: 3D-Laser Scan mittels SeaVisionTM aus der Wassersäule heraus.

Inspektion von Spundwänden mittels statischer Laser-Systemen
Für die Inspektion von Spundwänden wurde eine alte Mauer im See mit dem SeaVisionTM gescannt. Dabei konnten mit dem Standard Laser-System Entfernung zwischen 1m und 3m erreicht werden. Für quasistatische Scans wurde der Unterwassersäule in der Wassersäule geparkt und mittels eines Reglers (Station Keeping) an der Stelle fixiert. Die resultierenden 3D-Scans sind durch die aktive Reglung bzw. kleine Bewegungen des Roboters leicht verzerrt, dargestellt in **Abbildung 46**. Geometrische Messungen können jedoch entlang der erzeugten 3D Profilen ohne Einschränkungen verwendet werden, da sie jeweils von einem Messbild stammen.

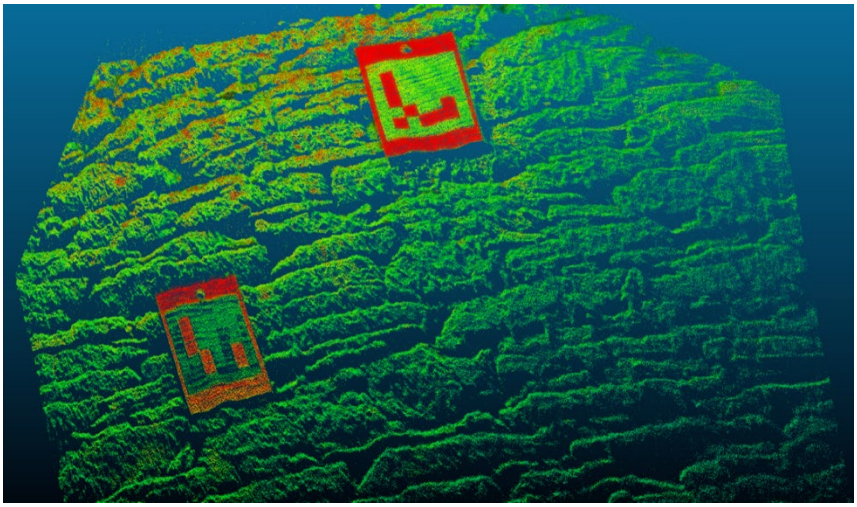


Abbildung 46: 3D-Laser Scan von einer Unterwasserwand mit Referenzmarkern.

Inspektion von Schiffsrümpfen
Der See, der für die Versuche verwendet wurde, wird auch zur Taucherausbildung verwendet. Daher befindet sich unteranderem ein gesunkenes Motorboot am Seegrund. Das Boot wurde beispielhaft gescannt, um einen Datensatz für eine Schiffsrumpfinspektion zu erzeugen. Der 3D-Scan ohne optischer Bewegungskompensation ist in **Abbildung 47** dargestellt. Hier sind Deformationen über den gesamten Schiffsrumpf sichtbar, die durch eine ungenaue Bewegung des Unterwasserroboters während des Scanvorganges hervorgerufen wurden. Eine Darstellung mit entsprechender visueller Bewegungskompensation ist der **Abbildung 50** zu entnehmen.

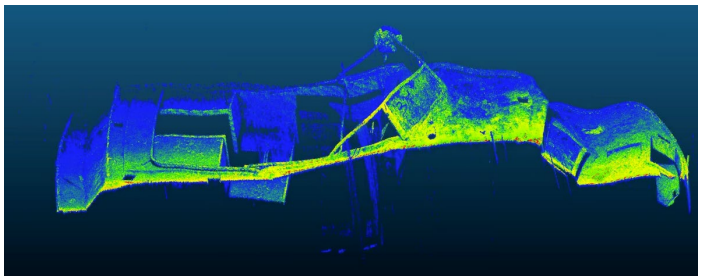


Abbildung 47: Unterwasser 3D-Scan eines Motorbootes ohne optischer Bewegungskompensation.

Bewegungskompensation von 3D Scans

Für die Tests der optischen Bewegungskompensation während des Scanvorganges, gemäß WP 5.3, wurden 3D-Scans von Unterwasserwänden, Schiffsrümpfen und vom See-Boden erstellt. Dazu wurde während des Scanvorganges die Scene mit rotem Licht beleuchtet, um optische Umgebungsfeature in den Kamerabildern zu erhalten, ohne den grünen Laser zu stören. Anschließend wurden die 3D Scans entsprechend **Abbildung 40** neu berechnet und die Bewegung des Trägerfahrzeuges kompensiert. Da die Kompensation in derselben Sensor-Domain wie die 3D-Punkt Messungen erfolgt, konnten so erfolgreich hochgenaue 3D Scans von dem See erstellt werden. Kompensierte 3D-Scans aus den Versuchen sind beispielhaft in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

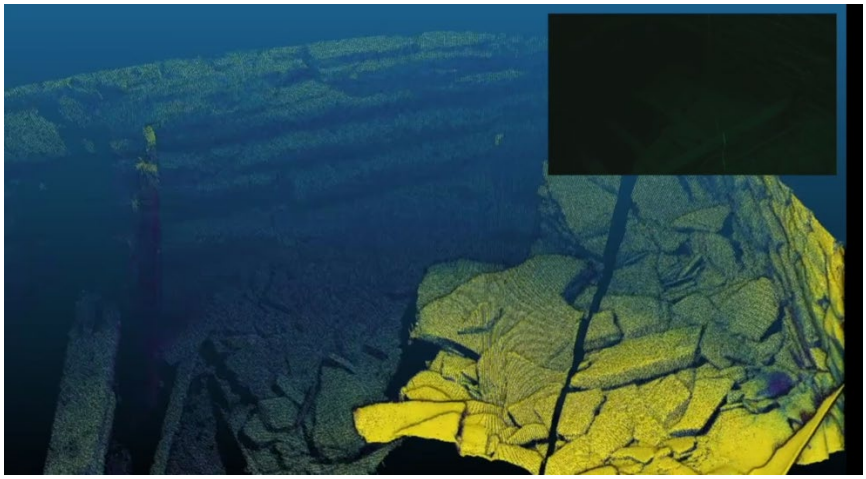


Abbildung 48: 3D-Laser Scan von einem versunkenem Mineneingang.

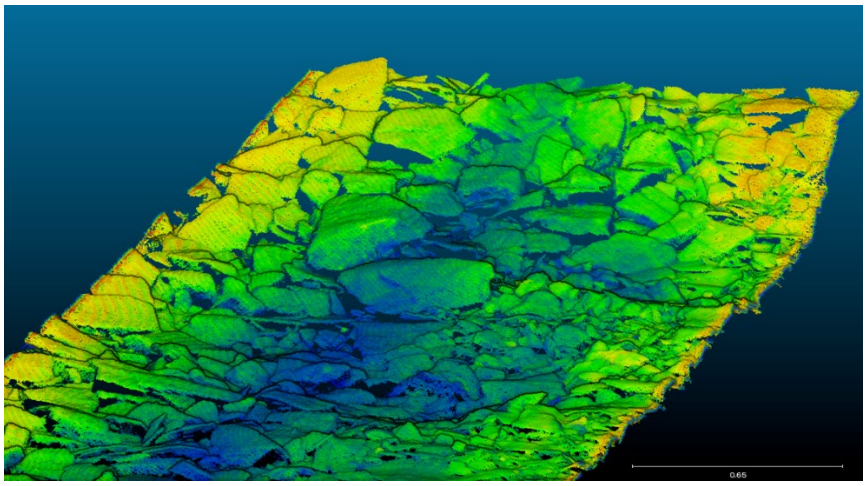


Abbildung 49: 3D-Laser Scan von dem Seeboden.

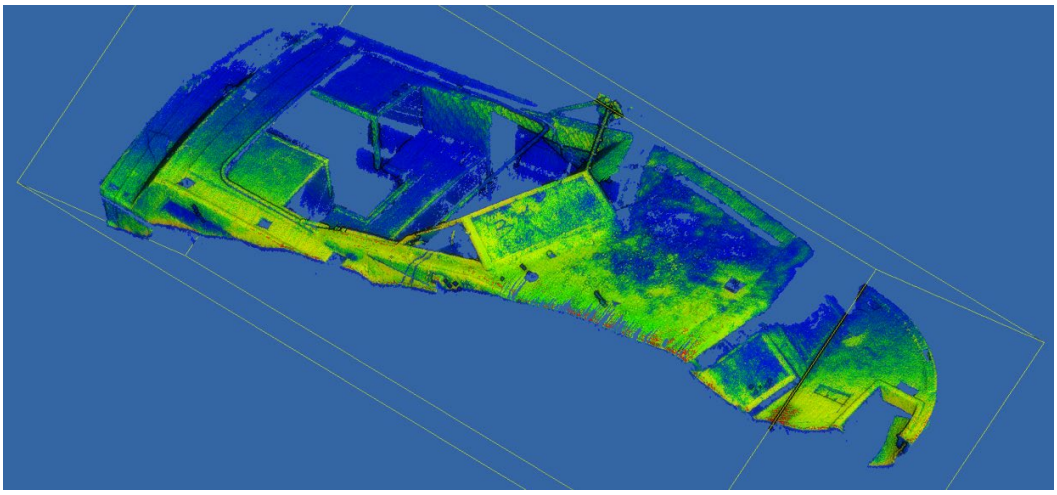


Abbildung 50: 3D-Laser Scan von einem versunkenen Motorboot.

Reichweitentest

Der SeaVisionTM Laser Scanner verwendet einen sichtbaren Laser, um mittels Triangulation 3D Messung durchzuführen. Für das gesamte elektromagnetische Spektrum wird grünes Licht dabei in flachen Gewässern am wenigsten stark absorbiert oder gestreut. Die Reichweite ist jedoch maßgeblich von der Trübung des Gewässers abhängig. Für die aktuell verfügbaren Laserdioden mit hoher Leistung wurde dabei eine maximale Reichweite von 8m-9m für den See ermittelt, dargestellt in **Abbildung 51**. Entsprechende Vergleichstests in einem Unterwassertank, **Abbildung 52**, haben dabei gezeigt, dass dies die obere Grenze für die meisten Flachwassereinsätze darstellt und realistisch Entfernungen 4-5m sind.

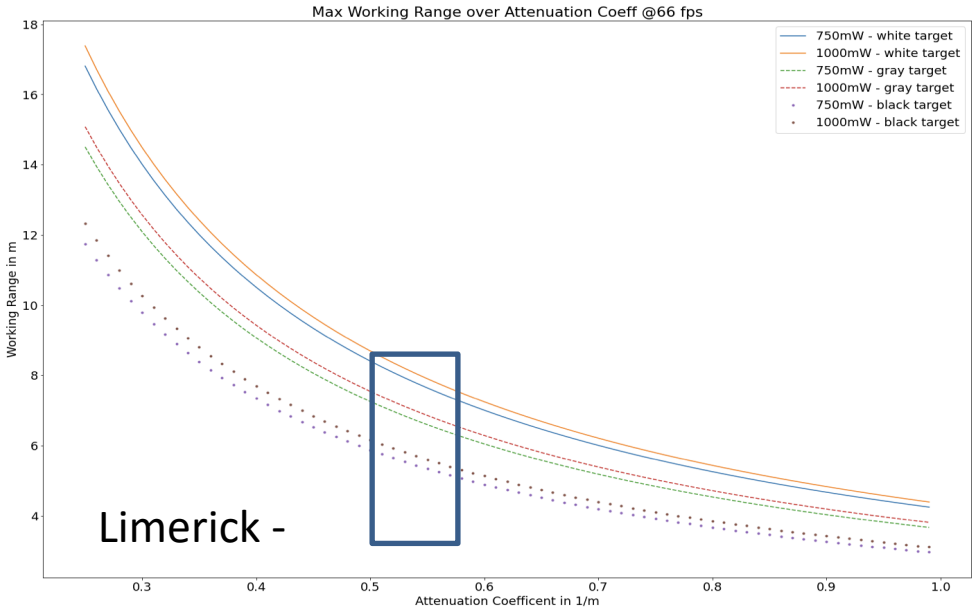


Abbildung 51: Maximale Messreichweite für verschiede Laser-Dioden, Objektfarbe und Absorptionskoeffizienten.

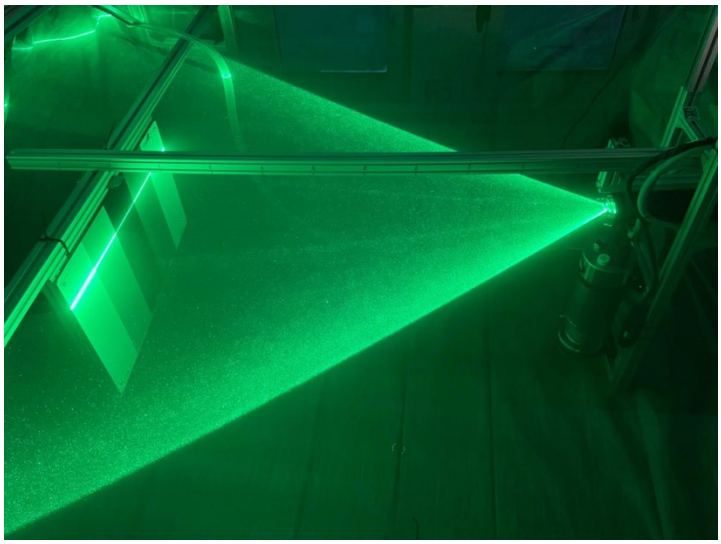


Abbildung 52: Vergleichstest in einem Unterwassertank mit leichter Trübung.

Schlussfolgerung

Durch die Versuche konnte gezeigt werden, dass eine Inspektion von Hafen und Schiffsrümpfen mittels eines Laser-Systems von kleineren Unterwasserfahrzeugen erfolgreich durchgeführt werden könnte. Eine entsprechende Bewegungskompensation kann dabei nachträglich erfolgen. Hierfür wurde das kommerzielle Tool Metashape von Agisoft so erweitert, dass es die Kamerabilder das Laser Systems verwendet, um eine Bewegungsschätzung durchzuführen, die dann mit den Laser Daten fusioniert werden können. Für die Experimente hat sich dabei eine Genauigkeit von 1-2% der zurückgelegten Strecke ergeben.

WP 6.4 Service Demonstration

Ziel: Planung und Durchführung der RoboVaaS-Service-Demonstration in Hamburg.

Ergebnis: Die Ergebnisse des Verbundprojektes wurden erfolgreich vom 11. Bis 15 Oktober 2021 auf dem ITS World Congress in Hamburg präsentiert. Dazu wurde ein Messestand zusammen mit den Verbundpartnern betrieben. Interessierten wurde durch Einzelgespräche am Stand sowie durch Demos im Hafenbecken die Ergebnisse umfassend präsentiert. Die Kraken Robotik GmbH unterhielt dabei ein Testbecken mit dem SeaVisionTM Sensor, um die entwickelten Technologien Besuchern vorzuführen. Der Messestand zusammen mit dem Testbecken ist in **Abbildung 53** dargestellt.

Abbildung 53: Messestand vom Verbundprojekt auf dem ITS World Congress 2021 in Hamburg.

WP 6.5 Feasibility & Performance Assessment

Ziel: Validierung des RoboVaaS-Konzepts und die Bewertung seiner Machbarkeit und Leistungsfähigkeit sowie die Untersuchung des gesamtwirtschaftlichen Vorteils des entwickelten RoboVaaS-Konzepts.

Ergebnis:
In diesem Arbeitspaket wurde der originale Verwertungsplan für das Projekt sowie eine Übersicht von möglichen Zielmärkten erstellt sowie die Möglichkeiten einer Verwertung ausgeleuchtet. Die ursprüngliche Verwertungsabsicht des Konsortiums bezieht sich dabei auf Akademische und Wirtschaftliche Verwertung. Durch die Pandemie und der damit einhergehenden Reduzierung der Treffen und Außenversuche ist eine Anpassung der Verwertungsabsichten erfolgt, die eher auf eine Verwertung von Teilresultaten abzielt. Die Möglichkeiten der Verwertung insbesondere im Bezug auf die Rechteverwertung sind herausgearbeitet worden und auf die jeweiligen Projektpartner angewandt worden.

Die Arbeiten sind in den MarterrA Bericht (Deliverable D7.2 – Dissemination & exploitation report) des Konsortiums eingeflossen.

WP 7.2 Dissemination

Ziel: Transfer der Projektergebnisse in Verbreitungsaktivitäten zur Maximierung des Einflusses und der Bekanntheit vom Verbundprojekt RoboVaaS.

Ergebnis: Im Folgenden sind nur Aktivitäten und Öffentlichkeitsarbeit aufgeführt, die von der Kraken Robotik GmbH (KRG) im Rahmen vom Verbundprojekt RoboVaaS durchgeführt worden sind.

Tabelle 3: Öffentlichkeitsarbeit.

Type	Year/Month	Partners	Description
Press Release	June 2018	KRG	Press Release on the award of the RoboVaaS project to Kraken. https://krakenrobotics.com/kraken-awarded-900000-contracts-for-evaluation-of-seavision-sensors-and-artificial-intelligence-software/ and https://www.globenewswire.com/news-release/2018/06/04/1516010/0/en/Kraken-Awarded-900-000-Contracts-for-Evaluation-of-SeaVision-Sensors-and-Artificial-Intelligence-Software.html
Conference Proceedings	2018	KRG	Accurate Detection and Localization of Checkerboard Corners for Calibration. In 29th British Machine Vision Conference, (BMVC-29), 03.9.-06.9.2018, Newcastle, o.A., 2018.
Invited Talk	2019	KRG	Workshop on Underwater Perception at ICRA 2019 Conference.
Conference Presentation	2020	KRG	Talk on Ship hull inspection at PortPIC 2020 conference in Hamburg.
Invited Talk	2021	KRG	Workshop on “Reliable AI for Marine Robotics: Challenges and Opportunities” at IROS 2021 Conference.

WP 7.3 Exploitation
Ziel: Erstellung eines Verwertungsplan

Ergebnis:

Tabelle 4: Exploitation Aktivitäten.

Type	Description	Status
Product Development	Sensor and carrier platform for shiphull inspection based on technologies and lessons learned during the RoboVaaS project.	Planning
Technology Demonstration	Demonstration of technology for automatic ship-hull inspection to reduce dry-dock times.	Offering to ship owner / operator consortium has been performed
Follow-up R&D project	Investigation of the use of deep-learning in the context of underwater laser scanners.	Project funded by H2020 European R&D funding.
Follow-up R&D project	Use of laser scanner for in-situ inspection of ship-hull states.	Planned

Die Arbeiten sind in den MarterrA Bericht (Deliverable D7.2 – Dissemination & exploitation report) des Konsortiums eingeflossen.

2. Wichtigste Positionen des Zahlenmäßigen Nachweises

Personalmittel:	€ 349.118,90
Sachmittel:	€ 30.055,77
Reisemittel:	€ 13.267,61
Sonstige unmittelbare Kosten:	€ 17.340,00

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die in RoboVaaS durchgeführten Arbeiten decken einen kritischen Entwicklungsbereich für Unterwassersensoren mit hohem Entwicklungsrisiko ab.

Kraken ist aktuell dabei einen weltweit operierenden Bereich aufzubauen, der einen 3D Inspektionsservice auf Basis von 3D Datenerfassung anbietet. Kunden sind Offshore Öl und Gas sowie Offshore Wind im kommerziellen Umfeld, sowie Umwelt-Monitoring und Archäologie im akademischen Bereich. Für die Kunden dieses Service-Bereichs ist es wirtschaftlicher die gewünschten Daten zu kaufen, anstatt ein SeaVision System anzuschaffen und es selbst zu betreiben. Damit ein solcher Service-Bereich wirtschaftlich arbeiten kann, ist es vor allem notwendig die Datenakquise und -auswertung schnell und reibungslos durchzuführen. Die Entwicklung der für diesen Bereich notwendigen Werkzeuge ist technisch jedoch ein hohes Risiko, da zu Beginn einer Entwicklung unklar ist, ob ein avisierter Lösungsweg auch zu Erfolg führt.

Die Arbeiten in RoboVaaS haben dazu beigetragen das Entwicklungsrisiko zu senken und erhöhen die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten für den Aufbau des Serviceangebots der Kraken Robotik GmbH. Es ist geplant die Ergebnisse in eigenfinanzierte Entwicklungen einfließen zu lassen.
Weiterhin waren die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in dem Teilprojekt nötig, um die für RoboVaaS ausgewiesenen Ziele, insbesondere im Bereich des Robotics as a Service und der Inspektion von Schiffen voranzutreiben. Die durchgeführten Arbeiten wurden durch den ursprünglichen Projektplan angemessen geplant, und im Verlauf des Projektes den sich ändernden Bedingungen angepasst.

4. Voraussichtliches Nutzen

Die Arbeiten und Entwicklungen in RoboVaaS haben gezeigt das eine remote Inspektion von Schiffsrümpfen und anderen Infrastrukturelementen im Hafenbereich durch Lasergetriebene Systeme sowie deren Integration in Remote Service Systeme möglich und sinnvoll ist. Auch wenn hier noch einige Arbeiten für eine Full-Service Angebot nötig sind, können einige der in RoboVaaS Sensor entwickelten Teilergebnisse schneller zur Anwendung kommen. Insbesondere die von Kraken entwickelten Verfahren zur Verbesserung der Lasersysteme in schwierigen Umgebungsbedingungen kann zu einer deutlichen technischen Verbesserung der kommerziell eingesetzten Systeme weiterentwickelt werden, und so einen Marktvorteil für die angebotenen Services erzeugen.

5. Fortschritt bei anderen Stellen

Insbesondere im Bereich der Lasersysteme haben sich im Projektverlauf auf internationaler Ebene drei Konkurrenten weiter auf dem Markt etabliert. Die Systeme von CathX Ocean (Abbildung 54) und Voyis (Abbildung 55) sind in der gleichen Klasse wie das Kraken System anzusiedeln. Beide Hersteller konnten ein gutes Marktangebot erzeugen, sind aber technisch auf etwa einem Nivea. Merkmale des Kraken Systems die so nicht in dem CathX und Voyis system zu finden sind unter anderem:

- Hohe Punktdichte durch Aufnahmen bis zu 120 fps.
- Verfahren der Laserlinie in einem Scan mode.
- Eigenbewegungskompensation durch Verwendung derselben Kamera zum Scannen und Errechnen der Eigenbewegung.

Vorteile von Voyis und CathX sind die mit angebotenen starken Lichtquellen, die für eine gleichzeitige visuelle Inspektion und Laser Inspektion verwendet werden können.

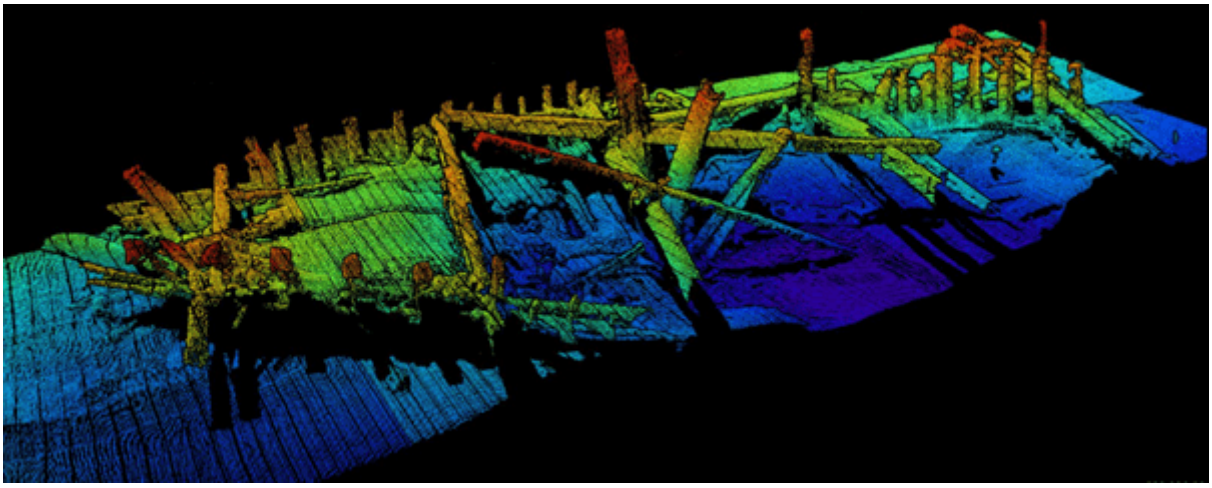


Abbildung 54: Black Sea MAP Project von CathX Ocean

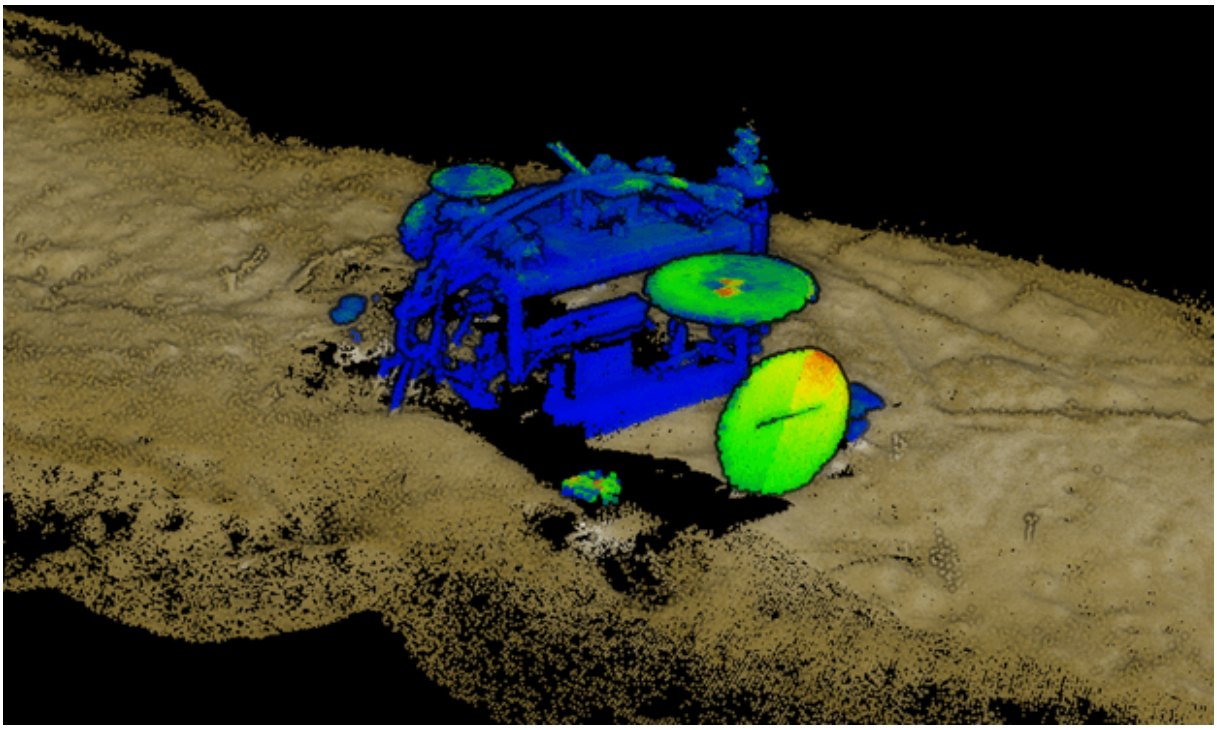


Abbildung 55: Spool and Hub Metrologies with Dynamic Laser Scanning – Voyis

Die Ergebnisse in Abbildung 56 wurden mit dem von Vaarst angebotenen System erzeugt. Hier kommt kein Laser zum Einsatz sondern nur eine Stereosystem mit einer SLAM Software. Die angebotene Software scheint gut Unterwasser zu funktionieren und hat insbesondere in der

Echtzeiterfassung von größeren Strukturen einen Vorteil gegenüber dem Kraken System. Allerdings ist hier eine deutlich reduzierte Genauigkeit gegeben, die insbesondere den Detailbereich betrifft. So können Details zum Beispiel zum Korrosionszustand des Messobjektes nicht detailliert erfasst werden. Dies ist mit dem Kraken System möglich.

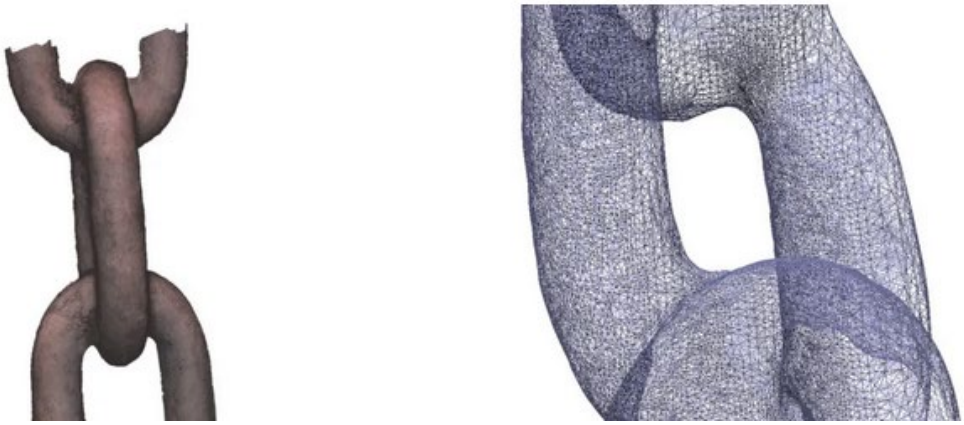


Abbildung 56: Verankerungsketten gescanned mit dem Vaarst System

6. Veröffentlichung nach Nr. 11

Die Veröffentlichungen von Projektergebnissen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Quellenverzeichnis

1. International Chamber of Shipping - Key Facts. cited: 07.09.2017; http://www.ics-shipping.org/shipping-facts/key-facts.
2. Kvamstad-Lervold, B. 9 paths into the maritime futur in Haugesundskonferansen. 2017. Haugesund, Norway.
3. Rødseth, Ø.J., et al., Big data in shipping-Challenges and opportunities. 2016
4. Alexander Duda, T. K., Jan Albiez and Frank Kirchner (2016). Self-referenced laser system for optical 3D seafloor mapping. OCEANS 2015. Monterey, CA, USA.
5. Alexander Duda, Underwater Visual Multi-Modal 3D Sensing. University Bremen, 2020 Bremen, DOI 10.26092/elib/130
6. DeepTrekker (2017). " DeepTrekker Official Web Page." Retrieved 28.08.2017, 2017, from https://www.deeptrekker.com/products/.
7. Aquabotix (2017). "Aquabotix Official Web Page." Retrieved 28.08.2017, 2017, from http://www.aquabotix.com/hybrid-rovsauvs.html.
8. S. Hannon. Underwater Mapping. LiDAR Magazine - Spatial Media, 3(1):1–4, 2013.
9. C. Balletti, C. Beltrame, E. Costa, F. Guerra, and P. Vernier. 3D reconstruction of marble shipwreck cargoes based on underwater multi-image photogrammetry. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, 3(1):1–8, 2015. ISSN 22120548. doi: 10.1016/j.daach.2015.11.003.
10. D. McLeod, J. Jacobson, M. Hardy, and C. Embry. Autonomous Inspection using an Underwater 3D LiDAR. In IEEE, editor, OCEANS - San Diego, pages 1–8, 2013. ISBN 9780933957404. doi: 10.23919/OCEANS.2013.6741175.
11. J. S. Jaffe. Underwater Optical Imaging: The Past, the Present, and the Prospects. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 40(3):683–700, 2015. ISSN 03649059. doi: 10.1109/JOE.2014.2350751.
12. J. Liu, A. Jakas, A. Al-Obaidi, and Y. Liu. Practical issues and development of underwater 3D laser scanners. In Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), pages 1–8, Bibao, 2010. IEEE. doi: 10.1109/ETFA.2010.5641223.
13. J. Albiez, A. Duda, M. Fritsche, F. Rehrmann, and F. Kirchner. CSurvey—An autonomous optical inspection head for AUVs. Robotics and Autonomous Systems, 67:72–79, 2015. ISSN 09218890. doi: 10.1016/j.robot.2014.10.004.
14. J. V. D. Lucht, M. Bleier, F. Leutert, and K. Schilling. STRUCTURED-LIGHT BASED 3D LASER SCANNING OF SEMI-SUBMERGED. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, IV(June):4–7, 2018. ISSN 21949050. doi: 10.5194/isprs-annals-IV-2-287-2018.
15. Agisoft. "Agisoft PhotoScan." from www.agisoft.com.
16. C. Balletti, C. B., E. Costa, F. Guerra, and P. Vernier (2015). "3D reconstruction of marble shipwreck car- goes based on underwater multi-image photogrammetry." Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage 3(1): 8.
17. KrakenRobotik (2021). "Kraken Robotic GmbH Subsea 3D Vision." from http://krakenrobotik.de/.

18. Foulkes, Alexander & Miall, R Christopher. (2000). Adaptation to visual feedback delays in a human manual tracking task. Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation cérébrale. 131. 101-10. 10.1007/s002219900286.
19. Grossberg, Michael D., and Shree K. Nayar. "High dynamic range from multiple images: Which exposures to combine." Proc. ICCV Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision (CPMCV). Vol. 3. No. 3. 2003.
20. C. Mertz, S. J. Koppal, S. Sia and S. Narasimhan, "A low-power structured light sensor for outdoor scene reconstruction and dominant material identification," 2012 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2012, pp. 15-22, doi: 10.1109/CVPRW.2012.6239194.
21. Google Maps. cited: 07.12.2021; https://www.google.com/maps