

UWSensor: Ein optisches Unterwasser-3D-Scannersystem für mobile Kartierung

**MICHAEL BLEIER¹, CHRISTOPH MUNKELT², MATTHIAS HEINZE²,
CHRISTIAN BRÄUER-BURCHARDT², STEFAN MARX³, DIRK FROMME⁴, CHRISTIAN DETTMER⁵,
HELGE ANDREAS LAUTERBACH¹ & ANDREAS NÜCHTER¹**

Zusammenfassung: Im Projekt UWSensor wurde ein neuartiger optischer 3D-Unterwassersensor basierend auf Streifenlichtprojektion entwickelt. In den Unterwassergehäusen des Sensors sind eine Stereokamera und ein GOBO-Projektor für die 3D-Messung, sowie eine Farbkamera und eine inertielle Messeinheit (IMU) integriert. Das Sensorsystem ermöglicht damit eine flächige 3D-Erfassung in einem Messvolumen von ca. $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$, sowie eine gleichzeitige Erfassung von Farbdaten. Die Musterprojektion ist vom Farbspektrum und durch den Einsatz von Hochleistungs-LED-Einheiten an den Unterwasserkontext angepasst. Die Vorteile des Sensorsystems sind eine sehr hohe Genauigkeit und eine 3D-Abtastrate von bis zu 60Hz. Die flächige Antastung bei gleichzeitig hoher Update-Rate ermöglicht eine fortlaufende Registrierung von Einzelscans. Dies ermöglicht den Einsatz zur mobilen Kartierung und 3D-Erfassung. Dieser Beitrag beschreibt das Gesamtsystem und die Datenverarbeitung, sowie erste Ergebnisse aus Offshore-Tests des Sensorsystems mit einem ferngesteuerten Unterwasserfahrzeug in der Ostsee.

1 Einleitung

Das Interesse an präziser und zuverlässiger Unterwassermesstechnik ist groß. Beispielsweise wollen Archäologen Artefakte in situ mit hoher Detailtreue dokumentieren und in der Meeresforschung benötigen Biologen Messwerkzeuge zur Beobachtung des Korallenwachstums.

Auch Geologen sind auf Messdaten für die Modellierung des Sedimenttransports angewiesen. Darüber hinaus ist für die Errichtung von Offshore-Bauwerken, sowie deren Wartung und Überwachung eine millimetergenaue Vermessung von vorhandenen Strukturen und Defekten unerlässlich. Hochauflösende 3D-Scanner ermöglichen eine kosteneffektive Maßkontrolle und Inspektion von Strukturen im Wasser, beispielsweise auf Lochfraßkorrosion.

Darüber hinaus müssen im Meer installierte Bauteile vorher passgenau an Land gefertigt werden, da eine Anpassung im Wasser nur schwer möglich ist. Bei Pipeline Verbindungs- und Anschlussstücken ist hierbei präzise Messtechnik nötig, um eine leckdichte Verbindung zu gewährleisten

¹ Informatik XVII Robotik, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Am Hubland, D-97074 Würzburg, E-Mail: [michael.bleier, helge.lauterbach, andreas.nuechter]@uni-wuerzburg.de

² Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, Albert-Einstein-Str. 7, D-07745 Jena, E-Mail: [Christoph.Munkelt, Matthias.Heinze, Christian.Braeuer-Burchardt]@iof.fraunhofer.de

³ Oktopus GmbH, Wischhofstr. 1-3 G.13, D-24148 Kiel, E-Mail: smarx@oktopus-kiel.eu

⁴ 3plusplus GmbH, Xantener Straße 191, D-47665 Sonsbeck, E-Mail: Dirk.Fromme@3plusplus.com

⁵ SeaReenergy Offshore Holding GmbH & Cie. KG, Alsterufer 26, D-20354 Hamburg, E-Mail: C.Dettmer@SeaReenergy.com

trotz der Ausdehnung aufgrund von Druck und Temperatur der transportierten Flüssigkeiten oder Gase. Die Genauigkeitsanforderungen sind hoch.



Abb. 1: UWSensor montiert im hydraulischen Manipulator eines Tauchroboters von Baltic Taucherei- und Bergungsbetrieb Rostock.

Beispielsweise werden für die Vermessung der Lage von Anschlussstellen von Pipelines eine relative Genauigkeit von wenigen Zentimetern und Winkelfehler von weniger als $0,5^\circ$ pro 100m Distanz gefordert. Dies wird in der Industrie unter anderem mit markerbasierter Nahbereichspho- togrammetrie erreicht. Allerdings benötigt dies zusätzliche Infrastruktur in Form von optischen Markern, welche vorher am Meeresboden ausgebracht werden müssen.

Im Rahmen des UWSensor-Projekts wurde ein neuer optischer 3D-Unterwassersensor für die mobile Offshore-Vermessung entwickelt. Der Sensor ist derart konzipiert, dass er für Messungen unter Einsatz eines ferngesteuerten Unterwasserfahrzeugs konfiguriert werden kann. Abbildung 1 zeigt den Sensor montiert im hydraulischen Manipulatorarm eines Tauchroboters. Der Sensor arbeitet hierbei in Bewegung und die Einzelscans werden miteinander registriert, um das Scanfeld kontinuierlich zu erweitern. Das Ziel ist eine 3D-Erfassung mit Bewegungsgeschwindigkeiten von bis zu 1 Meter pro Sekunde.

Die Vorteile des neu entwickelten Unterwasser-3D-Sensorsystems sind:

- Flächige Abtastung in einem Messvolumen von ca. $1 \times 1 \times 1$ m bei einem typischen Messab- stand im Bereich 0,5 – 2,5 m ermöglicht die Registrierung von Einzelscans
- Sehr hohe Genauigkeit mit einem systematischem Messfehler kleiner als 0,2 mm für stati- sche Scans in klarem Wasser mit einem Messabstand von bis zu 2,4 m (BRÄUER-BURCH- ARDT et al. 2022a)
- Hohe Punktdichte (ca. 1 Mio. Punkte pro Scan) und eine 3D-Abtastrate von bis zu 60 Hz
- Simultane Aufnahme von 3D-Punktwolken und hochaufgelösten Farbbildern mit LED-Blitz
- Automatische Bewegungskompensation basierend auf visueller und inertialer Odometrie während der Datenaufnahme
- Benutzerinterface mit Echtzeitvisualisierung zur Qualitätskontrolle und Unterstützung des Fernbedieners des Tauchroboters während der Datenaufnahme

2 Unterwasser 3D-Sensor

Der im Forschungsprojekt UWSensor neu entwickelte 3D-Sensor basiert auf aktivem Stereo mit einer aperiodischen Streifenlichtprojektion (HEIST et al. 2018). Hierzu wird ein Graphical Optical Blackout (GOBO) Projektor mit einer leistungsfähigen LED eingesetzt, um ausreichend Musterkontrast bei hoher Bildwiederholrate im Wasser zu erreichen. Die 3D-Daten Generierung basiert auf einem Mehrbildverfahren, bei dem typischerweise aus einer Sequenz von 10 Stereobildern eine Punktwolke rekonstruiert wird. Der Sensor erfasst kontinuierlich 3D-Daten in einem Bereich von ca. 1 m² bei einer Messdistanz von 2 m. Zwischen den einzelnen Stereobildsequenzen werden mit einer konstanten Datenrate von 25 Hz Farbbilder mit 7 MPixel aufgenommen. Diese decken einen größeren Sichtbereich von etwa 2×2 m bei einer Entfernung von 2 m ab. Hierzu werden die Kameras von einer zentralen Steuereinheit in einem alternierenden Betrieb getriggert. Zeitlich synchron mit den Farbbildern wird ein LED-Blitz ausgelöst, respektive die LED-Beleuchtung des Musterprojektors während der Stereoaufnahmen aktiviert. Zwischen den einzelnen Belichtungen sind kleine Totzeiten konfiguriert, um einen Lichteintrag durch Nachleuchten des LED-Blitz in die Musterprojektion zu minimieren.

2.1 Aufbau des Sensorsystems

Die Sensorik ist in vier Unterwassergehäusen integriert, die in Abbildung 2 zu sehen sind. In den äußeren beiden Gehäusen sind zwei monochrome Messkameras als Stereopaar verbaut. Diese werden in Kombination mit in einem der zentralen Gehäuse verbauten Musterprojektor für die 3D-Messung eingesetzt. Der Projektor ist eine Eigenentwicklung von Fraunhofer IOF und besteht aus einer im blauen Wellenlängenbereich arbeitenden LED mit hoher Lichtleistung, einer rotierenden Glasmasken (GOBO Rad), Motor und Projektionslinse. Zusätzlich sind im gleichen Gehäuse die elektrischen Treiber und Steuerelektronik integriert. Neben dem Unterwassergehäuse für den Projektor befindet sich ein weiteres Gehäuse, das die Farbkamera und eine inertielle Messeinheit (IMU) mit faseroptischen Gyroskop enthält. Die Unterwassergehäuse sind gemeinsam auf einer Carbonstange montiert, welche vom Trägerrahmen entkoppelt ist. Hierdurch wird eine gute Kalibrierstabilität des Sensorsystems erreicht werden. Zusätzlich befinden sich seitlich außen am Sensorträger zwei LED-Blitzlichter. Diese werden so angeordnet, dass sie primär das Messobjekt ausleuchten und nicht Partikel im Nahbereich der Kamera beleuchten, um Rückstreuung zu minimieren. Am Sensorträger befindet sich ein weiteres Unterwassergehäuse mit der Elektronik für die Spannungsversorgung und Netzwerktechnik für die Datenübertragung.

Sämtliche Sensordaten werden über Netzwerk übertragen. Hierzu wird beim Messeinsatz eine Glasfaser der Tether des Tauchroboters mitbenutzt. Die 3D-Berechnung und Auswertung der Daten erfolgt außerhalb des Wassers auf einer PC-Workstation am Schiff, die über die 10-Gigabit Glasfaserstrecke direkt mit dem Sensor verbunden ist. Hierdurch kann darauf verzichtet werden leistungsfähige Hardware für die Berechnung in den Unterwassergehäusen zu integrieren wodurch Kosten sowie Gewicht eingespart werden. Die 3D-Rekonstruktion und Teile der Weiterverarbeitung erfolgen dabei online, um eine direkte Qualitätskontrolle der Aufnahmen zu ermöglichen.



Abb. 2: UWSensor 3D-Sensorsystem in einem Wassertank bei Versuchen zur Kalibrierung.

2.2 Benutzerinterface

Ein wichtiger Punkt für den effektiven Einsatz des Sensors in einer Messkampagne ist das Benutzerinterface. Hierzu wurde im Projekt eine Bediensoftware von 3plusplus entwickelt, welche sowohl eine Visualisierung für den Piloten des Unterwasserfahrzeugs als auch die Schnittstelle für den Bediener des Sensors bereitstellt. Ein Beispiel für eine Ansicht der Nutzersoftware ist in Abbildung 3 dargestellt.

Die Software dient der Parametrisierung des Sensors, um schnell Belichtungszeit und Lichtempfindlichkeit an die Gegebenheiten im Wasser anzupassen. Hierbei unterstützen Visualisierungen, die beispielsweise über- bzw. unterbelichtete Regionen im Bild markieren sowie eine direkte Anzeige des 3D-Rekonstruktionsergebnisses für die Qualitätskontrolle bereitstellen. Des Weiteren erlaubt das Bedienprogramm eine Steuerung der Aufnahme des Datenstroms sowie das Auslösen von Einzelaufnahmen, z.B. für die Kalibrierung des Sensors.

Für den Fernbediener des Tauchroboters wird eine latenzarme Darstellung des Farbbilddatenstroms bereitgestellt, die dieser zur Navigation mitbenutzen kann. Um den Piloten zusätzlich zu unterstützen einen möglichst optimalen Messabstand zum Objekt einzuhalten, werden verschiedene optische Hilfen dargestellt, die schnell erfassbar und interpretierbar sind. Für den Piloten wird auf eine Visualisierung der 3D-Daten verzichtet, da diese einen kleineren Sichtbereich haben und schwieriger interpretierbar sind als die Farbbilder.

Für die Visualisierung des registrierten Gesamtmodells wurde eine browser-basierte Lösung unter der Nutzung von Potree (SCHÜTZ 2016) entwickelt. Dies beinhaltet eine Nutzerverwaltung, Organisation in Scanprojekte und automatische Erstellung von Voransichten der Punktwolken. Hierbei wurde gezielt auf Webtechnologie gesetzt, um einen einfachen Fernzugriff und eine Betrachtung der Daten ohne spezielle 3D-Software zu ermöglichen. Dies erlaubt zum einen, dass alle Beteiligten und Interessenten unabhängig von ihrer Vorerfahrung die Daten betrachten und untersuchen können. Zum anderen erlaubt es perspektivisch eine Übertragung der Daten über Mobilfunk oder Satellitenlink vom Messort ins Büro. Hierdurch können die Daten parallel ausgewertet werden und der Personaleinsatz auf dem Schiff kann dadurch während der Messkampagne potenziell verringert werden.

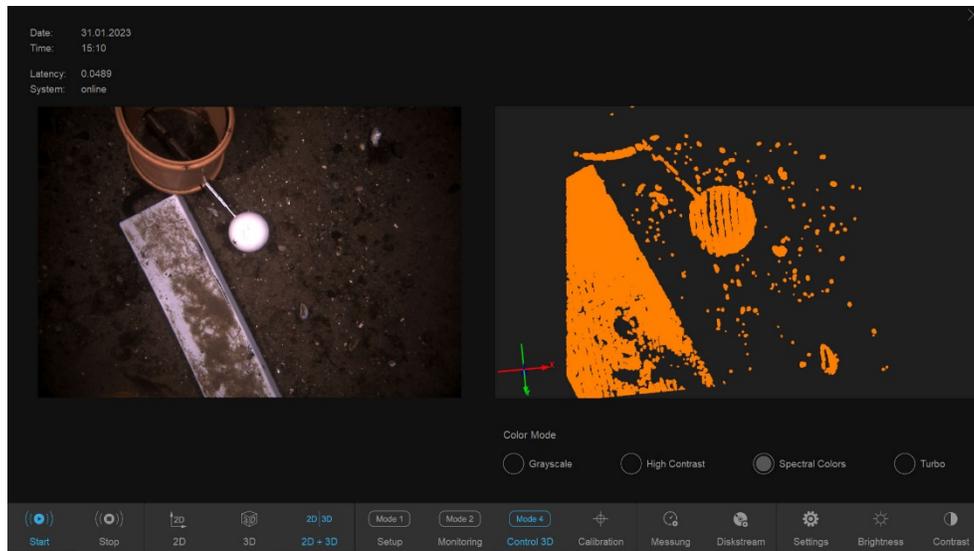


Abb. 3: Benutzerinterface des Sensors. Links: Farbbild des Sensors. Rechts: 3D-Punktwolke.

3 Datenverarbeitung für mobile Kartierung

Das System realisiert eine Bewegungsschätzung sowie eine Fusion der Einzelscans in ein global konsistentes 3D-Modell. Hierbei wird zunächst visuelle Odometrie in Kombination mit einem faseroptischen Gyroskop genutzt, um die Eigenbewegung des Sensors zu schätzen. Die daraus latenzarm abgeleiteten Posen werden dem Live-Aufnahmesystem des Sensors bereitgestellt, um eine Bewegungskompensation der 3D-Scans in Echtzeit zu realisieren. Anschließend wird eine mehrstufige Registrierungsstrategie angewendet, um die Schätzung der Trajektorie weiter zu verfeinern. Anhand der bestimmten Sensortrajektorie werden die Einzelscans zu einem Gesamtmodell aggregiert und in reduzierter Auflösung visualisiert, wodurch eine Qualitätskontrolle während der Datenaufnahme ermöglicht wird.

3.1 3D-Berechnung und Kalibrierung

Die 3D-Messung wird anhand des Stereobilddatenstroms mit Aufnahmen des aperiodischen Streifenmusters des GOBO-Projektors durchgeführt. Die 3D-Daten werden hierbei durch Stereotriangulation anhand der kalibrierten Messkameras berechnet. Die Korrespondenzsuche zwischen den Stereobildsequenzen basiert dabei auf der höchsten Korrelation des zeitlich veränderlichen Grauwertverlaufs der Pixel entlang der Epipolarlinie (HEIST et al. 2018).

Für den Unterwassereinsatz wird dabei ein erweitertes Lochkameramodell eingesetzt, das ausgehend von der geometrischen Modellierung des Strahlverlaufs die Brechung an den Medienübergängen zwischen Luft, Glas und Wasser berücksichtigt (BRÄUER-BURCHARDT et al. 2022b). Längenabweichungen in Abhängigkeit der Messdistanz werden zusätzlich durch eine Fehlerausgleichsfunktion im 3D-Objektraum kompensiert (BRÄUER-BURCHARDT et al. 2022a).

Die Kalibrierung der Stereokameras wird dabei anhand eines Kreismusters durchgeführt. Im Wasser wird hierzu die Kalibrierstruktur auf den Grund gelegt und mit dem Sensor ca. 10 – 20 Aufnahmen aus verschiedenen Winkeln erstellt. Hierbei kommen zusätzliche ArUco Marker auf dem

Kalibriermuster zum Einsatz, um jedem Kreis eine eindeutige ID zu geben. Die Kalibrierung wird mit BINGO (KRUCK 2014) als Bündelblockausgleichssoftware durchgeführt.

Die Stereokalibrierung wird sowohl zwischen den beiden monochromen Messkameras, als auch zwischen der linken Messkamera, die das Bezugskordinatensystem für die 3D-Messung darstellt, und der Farbkamera berechnet. Hierdurch werden im gleichen Durchgang die Parameter für das Kameramodell der Farbkamera als auch die Transformation zwischen dem Koordinatensystem von Farb- und 3D-Aufnahme bestimmt.

3.2 Visuelle und inertielle Odometrie

Zur Erstellung einer latenzarmen Trajektorienschätzung des Sensors unabhängig von den 3D-Daten wird visuelle und inertielle Odometrie (VIO) eingesetzt. Das Verfahren basiert hierbei auf VINS-Mono (QIN et al. 2018). VINS-Mono verwendet den Harris-Feature-Detektor (auch als Shi-Tomasi Methode bekannt), für die automatische Extraktion von Bildmerkmalen für visuelle Odometrie.

Zu Beginn der Aufnahme muss die Posenschätzung initialisiert werden. Dies bedeutet, dass die Methode nicht direkt aus dem Stillstand verwendet werden kann. Der Sensor muss zunächst bewegt werden, um genug Parallaxe zu erzeugen, dass eine initiale, unskalierte Structure from Motion (SfM) Rekonstruktion der Merkmalspunkte möglich ist. Diese wird dann durch eine Anpassung mit den aufintegrierten IMU-Daten skaliert. Sobald dieser Initialisierungsprozess abgeschlossen ist, kann mit der eigentlichen Messaufnahme begonnen werden. Dies erfolgt typischerweise nach ca. 2-4 Sekunden abhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit des Sensors.

Die Kalibrierung der relativen Lage und Orientierung zwischen Kamera und IMU wird in Luft bestimmt. Im Wasser bleiben die Parameter der Kamera-IMU-Transformation fixiert. Bei Aufnahmen im Wasser werden typischerweise aufgrund der Kinematik von Unterwasserfahrzeugen keine Rotationen um alle Sensorachsen erzielt. Dies führt zu einer ungenauen Schätzung insbesondere der Translation zwischen Kamera und IMU. Des Weiteren ist eine schnelle Initialisierung der visuellen Odometrie auch bei nahezu linearen Trajektorien möglich, wenn die Kamera-IMU-Transformation als bekannt vorausgesetzt wird. Die stochastischen Fehlerparameter wurden anhand des Funktionsgraphen der Allan-Varianz (HOU & EL-SHEIMY 2003) einer Aufnahme des IMU-Datenstroms über mehrere Stunden bestimmt. Diese dienen hier aber primär als Gewichte für die Abwägung zwischen Kamera und IMU-Messung und nicht als vollständiges Modell des Rauschverhaltens und der Messunsicherheit.

Die Zeitverschiebung zwischen Kamera und IMU-Datenstrom wird online bestimmt, da diese hardwaretechnisch keine präzise gemeinsame Zeitbasis besitzen. Die relative Bewegung wird dann durch Ausgleich der visuellen und IMU Messungen in einer lokalen Umgebung bestimmt. Die Optimierung wird hier lokal über eine fortlaufende Gruppe von Keyframes durchgeführt. Keyframes werden selektiert anhand eines Schwellwerts auf die mittlere Parallaxe der einzelnen Merkmalspunkte.

Zu beachten ist, dass in diesem Schritt keine Relokalisierung oder ein Schließen von Schleifen anhand visueller Merkmale eingesetzt wird. Das Ziel ist eine stetige Trajektorie ohne Sprünge zu

erhalten, da die visuelle Odometrie primär zur lokalen Bewegungskompensation eingesetzt werden soll. Ein eventuell durch Restfehler entstehender Drift wird später in der 3D-Registrierung kompensiert.

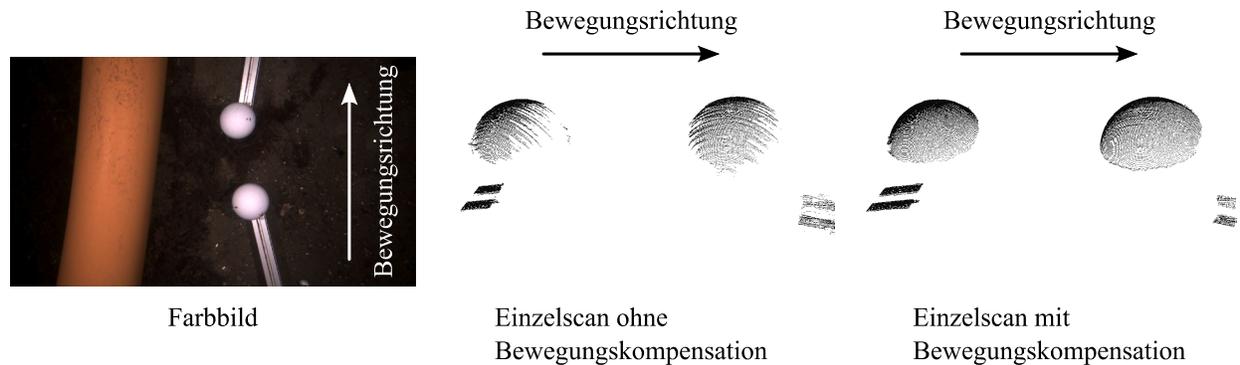


Abb. 4: Effekt der Bewegungskompensation auf das Ergebnis eines Einzelscans. Links: Farbbild der Messszene. Mitte: Scan ohne Berücksichtigung der Bewegung. Rechts: Verbessertes und vollständigeres Ergebnis mit höherer Punktdichte durch Bewegungskompensation.

3.3 Bewegungskompensation der 3D-Scans

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben nutzt die 3D-Berechnung eine zeitliche Korrelation über einen Stapel von Grauwertbildern von linker und rechter Messkamera. Der Ansatz setzt hierbei voraus, dass die Messszene statisch ist. Diese Annahme kann beim Einsatz für die mobile Kartierung nicht erfüllt werden. Eine quasi-statische Messsituation durch Hochgeschwindigkeits-Projektion und Aufnahmen ist im Wasser nicht erzielbar. Durch die Absorption des Lichts im Wasser, Trübung und begrenzte Leistung der Projektionseinheit sind längere Integrationszeiten der Kameras notwendig.

Deshalb wird im UWSensor der Ansatz verfolgt die Bewegung algorithmisch zu kompensieren. Der Ansatz für die Bewegungskompensation ist in (BRÄUER-BURCHARDT et al. 2022a) und (BLEIER et al. 2022) beschrieben. Hierbei wird für die Zeitspanne der Aufnahme der Messbilder eine näherungsweise lineare Bewegung des Sensors angenommen. Anhand der Bewegungsschätzung der visuellen Odometrie und einer angenommenen mittleren Messentfernung wird dann die Verschiebung im Bildraum approximiert. Um den berechneten Pixel-Offset werden dann die Grauwertbilder korrigiert, bevor die Korrespondenzsuche angewandt wird.

Dies führt zu einer deutlichen Verbesserung des Messergebnisses in Bewegung. Sowohl in Bezug auf die Vollständigkeit der Punktwolke, da mehr Punkte rekonstruiert werden können, als auch die Genauigkeit der Messungen. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel für eine Überfluggeschwindigkeit des Sensors von ca. 0,25 m/s. Das linke Bild zeigt das Farbbild der Messszene mit zwei Kugeln. In der Mitte ist das 3D-Rekonstruktionsergebnis ohne Berücksichtigung der Bewegung dargestellt. Die Kugeloberflächen können nicht vollständig erfasst werden und weisen streifenförmige Lücken auf. Im rechts dargestellten Ergebnis mit Bewegungskompensation sind die Kugeloberflächen mit deutlich höherer Punktdichte und gleichmäßig ohne Lücken erfasst.

3.4 Registrierung der Punktwolken

Aufbauend auf der initialen Schätzung der Trajektorie mittels visueller Odometrie wird eine mehrstufige Registrierungsstrategie angewandt, um die Trajektorie weiter zu verfeinern. Abbildung 5 gibt einen Überblick der Verarbeitungsschritte. Die ersten beiden Stufen werden zeitgleich zur Datenaufnahme ausgeführt und erlauben dem Operator eine erste Einschätzung der Ergebnisse. In der Nachverarbeitung erfolgt eine globale Optimierung der 3D-Punktwolke.

Zur Vorbereitung für die Registrierung, werden die 3D Daten zunächst gefiltert, um die Größe der zu verarbeitenden Punktwolke zu reduzieren und dabei eine ausgewogene räumliche Verteilung der gewählten Punkte zu gewährleisten. Mittels des Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus wird jede 3D Punktwolke sequenziell gegen ihre Vorgänger registriert. Ziel dieses Schrittes ist es, die Trajektorie lokal zu optimieren und damit die resultierende 3D Karte zu verbessern. Der Suchradius wird dabei in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Sensors sehr klein gewählt (im Bereich weniger cm) um der Gefahr von groben Registrierungsfehlern aufgrund des beschränkten Sichtfeldes sowie der zu erwartenden Strukturarmut der erfassten Szenerie zu begegnen.

Die Registrierung der Einzelscans ist implizit davon abhängig, dass ausreichend 3D-Struktur in der Punktwolke vorhanden ist, damit die ICP-Registrierung konvergiert. Abhängig von der erfassten Messszene ist dies nicht immer gegeben. Wird beispielsweise nur die zylinderförmige Oberfläche eines Rohres erfasst, dann ist die Registrierung in Richtung des Rohres nicht beschränkt. In diesen Fällen kann die ICP-Registrierung deaktiviert werden und es wird in diesem initialen Schritt ausschließlich die Trajektorien-schätzung der visuellen Odometrie verwendet.

Da sich verbleibende Restfehler in der Registrierung akkumulieren und der bestehende Drift der visuellen Odometrie nicht vollständig eliminiert wird, erfolgt im nächsten Schritt eine zweite Registrierung mit einem zeitkontinuierlichen ICP-Verfahren. Grundgedanke ist, dass der Fehler der Trajektorie in zeitlicher Nähe einer betrachteten Pose vernachlässigbar ist. Die Trajektorie wird dann in Teilabschnitte zerlegt und mehrere aufeinander folgende 3D Scans um einen gewählten Referenzscan zu einer Teilkarte zusammengefasst. Die Teilkarten werden wiederum gegen ihre Vorgänger registriert. Die Änderung der Pose eines Referenzscans wird im Anschluss auf die Posen zwischen zwei Referenzscans verteilt, um die Kontinuität der Trajektorie zu wahren. Für kleine Änderungen ist dabei eine lineare Verteilung der Translation bzw. eine Verteilung der Rotationsfehler mit Spherical Linear Interpolation (SLERP) ausreichend. Zur Korrektur des akkumulierten Drifts werden Schleifen erkannt und geschlossen (SPRICKERHOF et al 2011). Dazu werden die Posen der aggregierten Teilkarten optimiert und die Änderungen anschließend analog zu oben auf die Einzelposen verteilt.

Die resultierende Karte dient der Visualisierung während des Messvorgangs. Um die Datenmenge für die Visualisierung zu reduzieren, werden die Einzelscans ausgedünnt. Hierzu wird zum Gesamtmodell jeweils nur dann ein neuer Scan hinzugefügt nachdem sich das Sensorsystem mindestens 5-10 cm bewegt hat, je nach gewünschter Punktdichte. Die aus den aggregierten Einzelscans anhand der bestimmten Trajektorie zusammengesetzte 3D-Karte wird nachfolgend in einem Octree-basierten Verfahren in der räumlichen Auflösung reduziert und der Visualisierung zur Verfügung gestellt. Dies passiert asynchron zur Trajektorien-schätzung und Registrierung. Der Visualisierung wird anschließend ein aktualisiertes Gesamtmodell alle ca. 1-5 Sekunden zur Verfügung gestellt.

Die Nachverarbeitung der Daten zur Erstellung der finalen 3D Punktwolke erfolgt mit zeitkontinuierlichem SLAM (ELSEBERG et al. 2013). Die überlappenden Teilkarten werden in diesem Schritt mit Graph basiertem SLAM rigide eingepasst. Das Resultat dient als Startwert für die semi-rigide Registrierung zur numerischen Minimierung des Trajektoriefehlers.

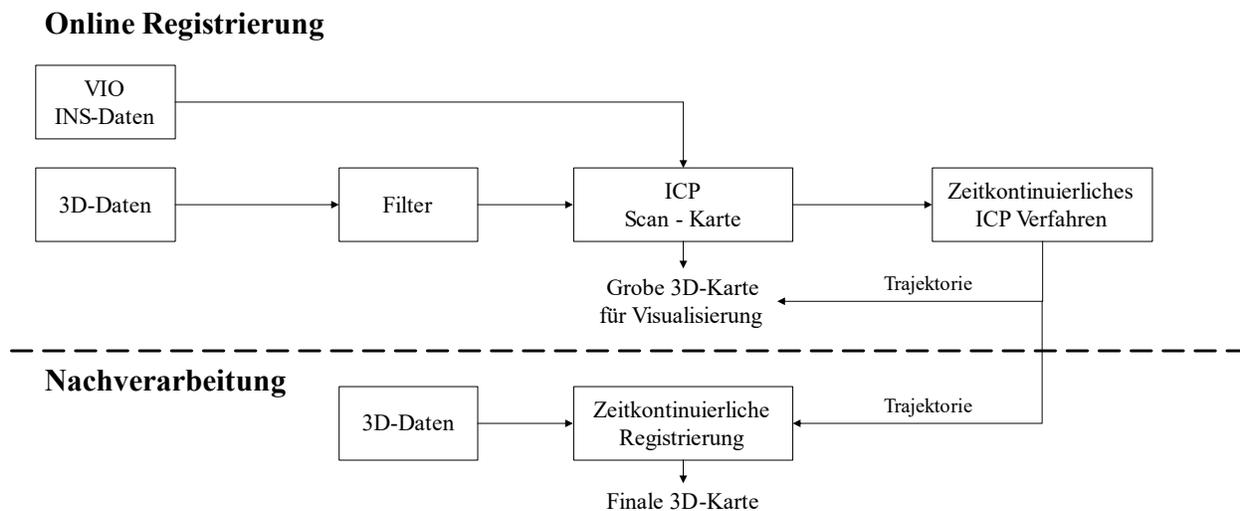


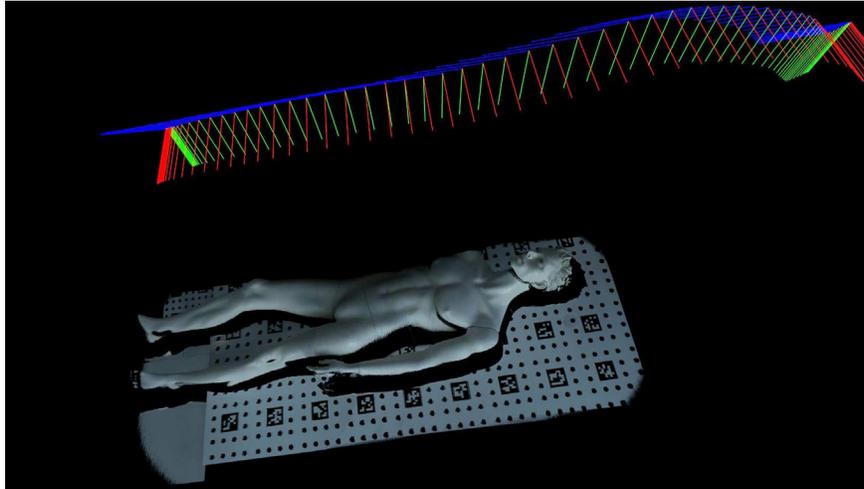
Abb. 5: Ablauf der Registrierung: Der obere Teil der Grafik stellt die Echtzeitberechnung während der Datenaufnahme dar. Der untere Teil beschreibt den Ablauf der Nachverarbeitung.

3.5 Erstellung farbiger 3D-Modelle

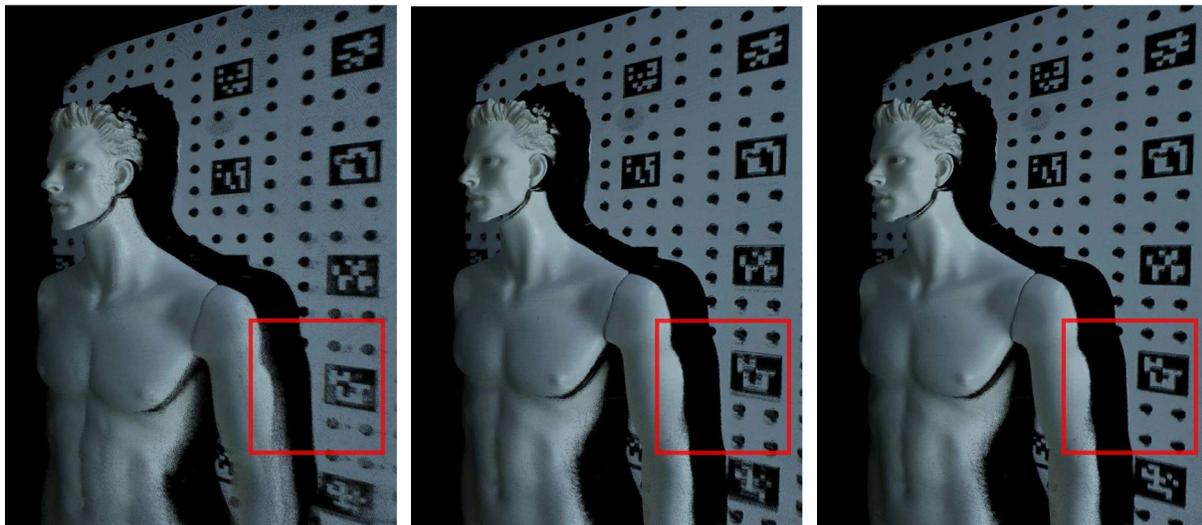
Neben der Bewegungskompensation der 3D-Scans ist die Trajektorien-schätzung eine wesentliche Voraussetzung für die präzise Einfärbung der Punktwolken. Da die Farbbilder zeitversetzt zwischen den Stereobildern der Messkamera aufgenommen werden, besteht zwischen dem 3D-Scan und dem nächsten Farbbild ein Zeitunterschied von bis zu 10 ms. Daher muss die Bewegung des Sensors berücksichtigt werden, um die Farbinformation auf die Punktwolke zu projizieren. Dies wird auf folgende Weise durchgeführt: Zunächst wird die anhand visuelle Odometrie berechnete Trajektorie interpoliert, um die relative Bewegung der Kamera zwischen der Aufnahmezeit des 3D-Scans und dem Farbbild zu berechnen. Hierzu werden die Zeitstempel der Sensorinformationen genutzt. Anschließend wird die Punktwolke anhand der Ko-Kalibrierung von Farbkamera und Stereosensor und der geschätzten Kamerabewegung in das Koordinatensystem der Farbkamera transformiert. Schließlich wird die Punktwolke eingefärbt, indem die Messpunkte anhand des Kameramodells in das Farbbild projiziert werden.

Abbildung 6 zeigt ein Beispiel für eine Punktwolke, die mit dem Sensorsystem in Bewegung im Labor aufgenommen wurde. Eine Schaufensterpuppe wurde in Luft vor einer Kalibriertafel aufgenommen. Das obere Bild zeigt hierbei die farbige Punktwolke und eine Visualisierung der einzelnen Sensorposen. Die unteren Bilder zeigen den Effekt der Trajektorie auf das Gesamtmodell. Das untere linke Bild zeigt das initiale Ergebnis anhand der in Echtzeit berechneten Trajektorien-schätzung der visuellen Odometrie. Durch ein rotes Viereck sind Registrierfehler hervorgehoben. Das mittlere Bild zeigt das verbesserte Ergebnis nach der 3D-Registrierung. Die Registrierung

führt zu einer konsistenten Punktwolke des Gesamtmodells. Die Farbzurordnung ist allerdings ungenau, da hier anhand des zeitlich nächsten Farbbildes eingefärbt wurde, ohne die Bewegung zu berücksichtigen. Dieser Fehler wird im Endergebnis, das im Bild unten rechts zu sehen ist, reduziert. Hier wurde die Zuordnung der Farbinformation anhand der bestimmten Sensortrajektorie verbessert.



Eingefärbte Punktwolke und Sensorposen



Visuelle und inertielle Odometrie

3D-Registrierung

Farbprojektion mit
Bewegungskompensation

Abb. 6: Punktwolke einer Schaufenstertuppe die durch Bewegung des Sensorsystems im Labor aufgenommen wurde. Oben: Eingefärbte Punktwolke und Visualisierung der Sensorposen. Unten links: Initiales Ergebnis anhand VIO. Unten Mitte: Ergebnis nach 3D-Registrierung. Unten rechts: Verbesserte Farbprojektion anhand interpolierter Trajektorie.

4 Ergebnisse

Im Verlauf der Sensorentwicklung wurden verschiedene Tests unter Wasser durchgeführt. Neben der beispielhaften 3D-Erfassung von Testobjekten wurden Genauigkeitsuntersuchungen an Kugelstäben und Ebenheitsnormalen durchgeführt, um den zufälligen und systematischen Messfehler abschätzen zu können.

Zunächst erfolgten diese Tests in Wasserbecken, um den logistischen Aufwand so gering wie möglich zu halten und die Einflüsse wie Wasserqualität, Messentfernung und Sensorgeschwindigkeit selbst exakt steuern zu können. Nach erfolgreicher Absolvierung der Wasserbeckentests konnte das Sensorsystem einem echten Offshore-Einsatz in der Ostsee mit einem ferngesteuerten Unterwasserfahrzeug unterzogen werden. Bei den Tests im Wasserbecken wurde der Sensor für eine Messentfernung von $2 \text{ m} \pm 0.5 \text{ m}$, beim Offshore-Einsatz für eine Messentfernung von $1.3 \text{ m} \pm 0.3 \text{ m}$ eingestellt und entsprechend kalibriert.

Bei ersten Experimenten im mit klarem Süßwasser gefüllten Wasserbecken wurden zunächst systematischer und zufälliger 3D-Messfehler eines Einzelscans bestimmt. Dazu wurden in Anlehnung an die VDI/VDE-Norm 2634 (VDI/VDE 2008) Längenmessfehler und Ebenheitsfehler sowie das Rauschen der 3D-Messpunkte in Abhängigkeit von der Messentfernung untersucht. Der Sensor wurde an einem Kran befestigt und konnte exakt bzgl. der Testmesskörper (Kugelstab, Ebenheitsnormal) positioniert werden. Die ausführlichen Ergebnisse sind in (Bräuer-Burchardt et al. 2022a) dokumentiert. Es ergab sich eine leichte Drift der Kugeldurchmesser und Längenmesswerte proportional zur Messentfernung von 0.08 %. Dieser Fehler konnte mit einer 3D-Korrekturfunktion minimiert werden. Der Ebenheitsfehler nahm bei großer Messentfernung zu (Bräuer-Burchardt et al. 2022a). Hier konnte aufgrund einer zu geringen Messwertanzahl keine Korrekturfunktion bestimmt werden. Aufgrund der Eigenschaften des verwendeten erweiterten Lochkameramodells (Bräuer-Burchardt et al. 2022b) ist jedoch das Auftreten eines entsprechenden entfernungsabhängigen Fehlers bei der relativ großen Tiefenvariation im erwarteten Bereich.

Bei den Messungen im Seewasser konnten aufgrund der Navigation am Remotely Operated Vehicle (ROV) und der im Vergleich zum Wasserbecken erheblich eingeschränkten Sicht keine exakten Entfernungen zu den Messobjekten angefahren werden. Die Messobjekte wurden im Vorbeifahren gescannt. Eine entfernungsabhängige Genauigkeitsuntersuchung wurde anhand der im Nachhinein bestimmten mittleren Messentfernung vorgenommen. Es konnten Messwerte im Bereich von ca. 1.1 m bis 1.6 m Entfernung bestimmt werden. Auch hier wurde eine entfernungsabhängige Drift von 0.4 % bei der Abstandsmessung beobachtet, die jedoch nicht bei der Bestimmung des Kugeldurchmessers zu verzeichnen war. Als mögliche Ursache kommen systematische Fehler bei der Bestimmung des Kugelradius in Betracht. Der zufällige Längenmessfehler bei Wiederholungsmessungen in gleicher Messentfernung verdoppelte sich in etwa im Vergleich zur Wasserbeckenmessung. Allerdings ist dieser Wert nicht signifikant, da zu wenige Messwerte vorhanden waren und keine Garantie für gleichbleibende äußere Bedingungen gegeben werden kann. Einzelne Messwerte sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die kalibrierte Länge der Kugelhantel beträgt dabei 497,612 mm. Bei Sensor 2 tritt außerdem ein leichter Skalierfehler von knapp einem Prozent auf.

Tab. 1: Zufälliger Längenmessfehler bei Messungen im Wasserbecken (Sensor 1) und offshore in der Ostsee (Sensor 2). Die kalibrierte Länge der Kugelhantel ist 497,612 mm.

Sensor 1	Wasserbecken		Sensor 2	Ostsee	
Entfernung	Messung Kugelabstand	n	Entfernung	Messung Kugelabstand	n
1.54 ± 0.00 m	497.602 ± 0.030 mm	6	1.16 ± 0.02 m	499.655 ± 0.105 mm	10
1.94 ± 0.01 m	497.873 ± 0.040 mm	6	1.28 ± 0.01 m	500.067 ± 0.186 mm	10
2.24 ± 0.00 m	498.144 ± 0.037 mm	5	1.57 ± 0.03 m	501.716 ± 0.167 mm	10

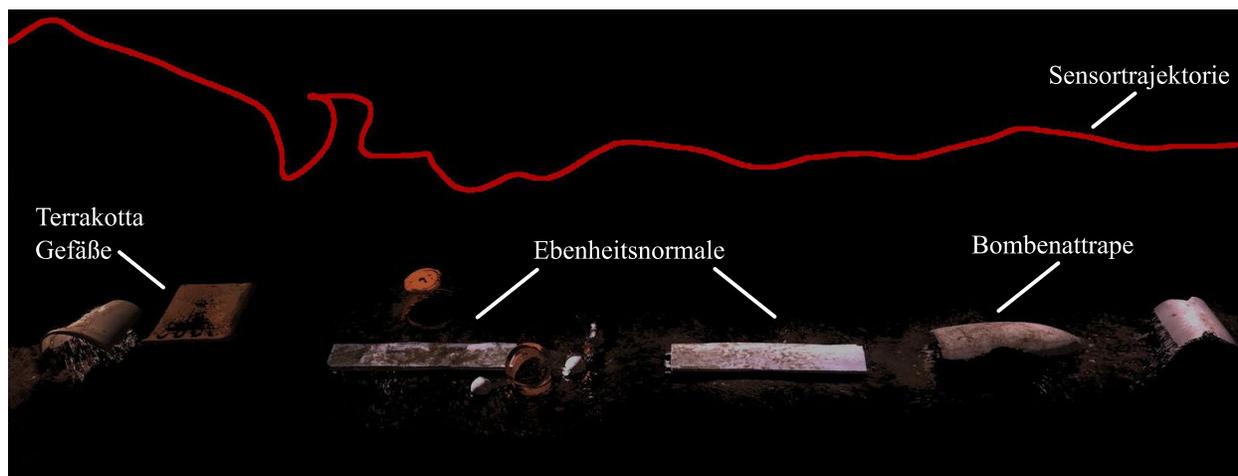


Abb. 7: Beispiele für eine Punktwolke die mit dem Unterwassersensor in der Ostsee in Bewegung aufgenommen wurden. Die rote Linie stellt die bestimmte Sensortrajektorie dar.

Ein signifikanter Ebenheitsfehler wurde bei Entfernungen unter 1.2 m registriert, bei größeren Entfernungen trat kein typischer „Durchbiegungseffekt“ auf. Allerdings kann auch hier wegen zu geringer Anzahl von Messungen in unterschiedlichen Entfernungen keine Korrekturfunktion bestimmt werden.

Insgesamt konnte festgestellt werden, dass sich der zufällige Messfehler bei Seebedingungen im Vergleich zum Wasserbecken in etwa verdoppelte, was sowohl die Wiederholungsmessungen des Kugelabstands als auch das Rauschen der 3D-Messpunkte betrifft. Der systematische Messfehler war bei den Seemessungen wesentlich höher als im Wasserbecken. Ursache hierfür kann eine weniger gute Kalibrierung sein, die jedoch aufgrund fehlender Ressourcen nicht wiederholt und optimiert werden konnte.

Neben der Erfassung der kalibrierten Testkörper wurde das Sensorsystem bei der mobilen Erfassung von Rohrstrukturen validiert. Das Weitern wurden 3D-Scans von einer Bombenattrape und Terrakotta-Gefäßen erstellt. Ein Beispiel für eine in Bewegung aufgezeichnete Punktwolke während der Seerprobung ist in Abbildung 7 zu sehen.

Zur Überprüfung der Trajektorienbestimmung anhand der visuellen und inertialen Odometrie wurden Kugelleisten am Meeresboden ausgebracht. Die Kugeln auf einer Leiste haben einen Durchmesser von 10 cm und einen Abstand von 2,21 m. Die Kugelleisten wurden dann mit dem am

ROV montierten Unterwassersensor eingescannt. In Abbildung 8 ist die zusammengesetzte Punktwolke aus in Bewegung aufgenommenen 3D-Scans abgebildet. Die rote Linie visualisiert hierbei die vom System in Echtzeit geschätzte Trajektorie.

Ein Einzelscan des Sensors erfasst in dieser Aufnahme ein Stück von ca. 40 cm der Kugelleiste. Die Kugelabstände wurden durch ein Einpassen von Kugeln mit festem Durchmesser überprüft. Der mittlere gemessene Kugelabstand ist $2,212 \pm 0,011$ m. Die mittlere absolute Abweichung der Kugelabstände ist dabei 8 mm. Eine Verbesserung des Ergebnisses durch Registrierung der 3D-Daten konnte in diesem Fall bisher nicht erreicht werden, da die Scans zu wenig 3D-Struktur enthalten. Aufgrund der hohen Reflektivität der Kugeln und Metallprofile konnte Meeresboden und Kugelleisten nicht gleichzeitig in einem Scan erfasst werden.

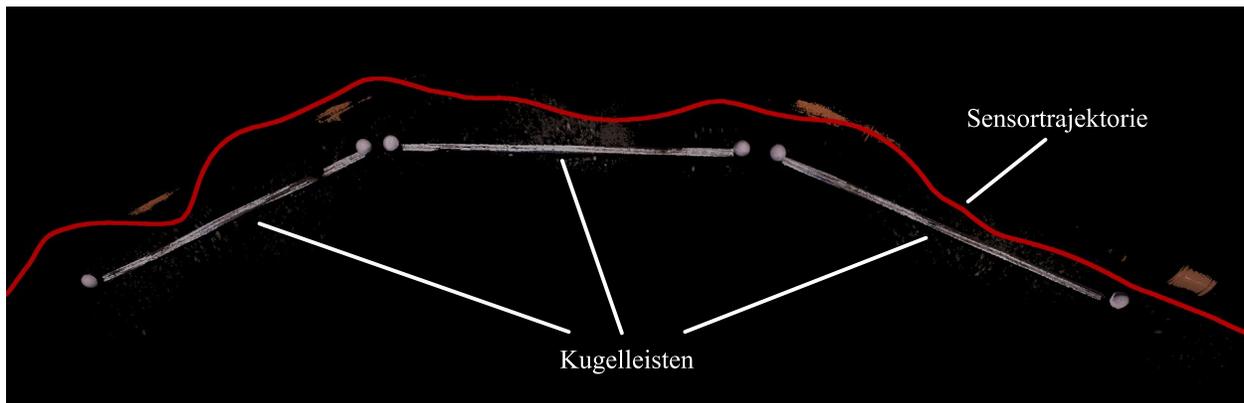


Abb. 8: Zusammengesetzte Punktwolke von drei Kugelleisten aus in Bewegung aufgenommenen Scans mit dem Sensor 2 bei Offshore-Tests in der Ostsee. Die rote Linie visualisiert die Trajektorie des Sensors.

5 Fazit & Ausblick

Mit dem im Projekt UWSensor neu entwickelten Sensorsystem konnte eine mobile Erfassung von Strukturen sowohl im Klarwasser als auch bei Experimenten mit einem Unterwasserfahrzeug in der Ostsee demonstriert werden. Die 3D-Rekonstruktion basierend auf aktivem Stereo unterstützt durch Streifenlichtprojektion erlaubt eine flächige Erfassung und eine 3D-Abtaste von bis zu 60Hz. Ein besonderes Augenmerk liegt auf den Kalibrierverfahren für den Unterwasser-Stereo-Scanner, die ausgehend von der geometrischen Modellierung des Strahlverlaufs unter Berücksichtigung der Refraktion an den Medienübergängen und zusätzlichen Verfeinerungsverfahren zu äußerst geringen systematischen Fehlern führen. Das System realisiert eine Bewegungsschätzung sowie eine Fusion der Einzelscans in ein global konsistentes 3D-Modell. Bei mobilen Messungen konnte eine Verbesserung der Punktwolke durch eine automatische Kompensation der Bewegung anhand visueller Odometrie erzielt werden.

In Experimenten im Klarwasser konnten Messergebnisse mit sehr kleinem systematischem Fehler erzielt werden, die im gleichen Genauigkeitsbereich sind wie Messungen in Luft mit vergleichbarem Messvolumen. Bei der Seerprobung zeigte sich eine Verdopplung des zufälligen Längen-

messfehler bei Wiederholungsmessungen in gleicher Messentfernung im Vergleich zur Wasserbckenmessung. Des Weiteren trat ein leichter Skalierfehler von knapp einem Prozent auf. Eine umfassende Auswertung steht noch aus.

Die Anwendung der 3D-Registrierung war nicht auf allen Offshore-Aufnahmen erfolgreich. Aufgrund des eingeschränkten Sichtfelds und Messbereichs ist nicht immer genügend 3D-Struktur vorhanden, um die Registrierung vollständig in allen Raumrichtungen zu beschränken. Hier könnte ein kombiniertes Verfahren, welches Farb- und 3D-Informationen gleichzeitig ausrichtet, die Ergebnisse verbessern. Das vorgestellte Verfahren nutzt zwar sowohl die Farbbilder als auch die 3D-Scans für die Trajektorien-schätzung. Allerdings wird die Trajektorie in einem sequenziellen Verfahren und nicht in einem gemeinsamen Ausgleichsverfahren berechnet. Weitere Forschung ist hier notwendig, um eine hochgenaue und robuste Registrierung in allen Situationen zu gewährleisten.

6 Danksagung

Die vorgestellte Arbeit wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des Verbundprojekts UWSensor - Unterwasser-3D-Sensor. Die Autoren bedanken sich bei allen Beteiligten, insbesondere bei Fraunhofer IGD in Rostock, Digital Ocean Lab (DOL) und Baltic Taucherei- und Bergungsbetrieb Rostock, für die Zusammenarbeit bei den Feldtests.

7 Literaturverzeichnis

- BLEIER, M., MUNKELT, C., HEINZE, M., BRÄUER-BURCHARDT, C., LAUTERBACH, H. A., VAN DER LUCHT, J. & NÜCHTER, A., 2022: Visuelle Odometrie und SLAM für die Bewegungskompensation und mobile Kartierung mit einem optischen 3D-Unterwassersensor. Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2022, Jade Hochschule, 394-405.
- BRÄUER-BURCHARDT, C., MUNKELT, C., BLEIER, M., HEINZE, M., GEBHART, I., KÜHMSTEDT, P. & NOTNI, G., 2022a: A new sensor system for accurate 3D surface measurements and modeling of underwater objects. Applied Sciences, **12**(9), 4139, <https://doi.org/10.3390/app12094139>.
- BRÄUER-BURCHARDT, C., MUNKELT, C., HEINZE, M., GEBHART, I., KÜHMSTEDT, P. & NOTNI, G., 2022b: Underwater 3D Measurements with Advanced Camera Modelling. PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, **90**, 55-67, <https://doi.org/10.1007/s41064-022-00195-y>.
- ELSEBERG, J., BORRMANN, D. & NÜCHTER, A., 2013: Algorithmic solutions for computing accurate maximum likelihood 3D point clouds from mobile laser scanning platforms. Remote Sensing, **5**(11), 5871-5906, <https://doi.org/10.3390/rs5115871>.
- HEIST, S., DIETRICH, P., LANDMANN, M., KÜHMSTEDT, P. & NOTNI, G., 2018: High-speed 3D shape measurement by GOBO projection of aperiodic sinusoidal fringes: A performance analysis. Proceedings of SPIE Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications VII, Vol. 10667, 106670A, SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging, 17. - 19. April 2018 in Orlando, USA, <http://doi.org/10.1117/12.2304760>.

- HOU, H. & EL-SHEIMY, N., 2003: Inertial sensors errors modeling using Allan varianc. Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2003), September 2003 in Portland, USA, 2860-2867.
- KRUCK, E., 2014: BINGO 6.6 - Bundle Triangulation for Aerial Photogrammetry and Close Range Applications. <https://bingo-atm.de/solutions/>, letzter Zugriff 31.01.2023.
- SCHÜTZ, M., 2016: Potree: Rendering large point clouds in web browsers. Dissertation, Technische Universität Wien.
- SPRICKERHOF, J., NÜCHTER, A., LINGEMANN, K. & HERTZBERG, J., 2011: A heuristic loop closing technique for large-scale 6D SLAM. *Automatika*, **52**(3), 199-222, <https://doi.org/10.1080/00051144.2011.11828420>.
- QIN, T., LI, P. & SHEN, S., 2018: VINS-Mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator. *IEEE Transactions on Robotics*, **34**(4), 1004-1020, <https://doi.org/10.1109/TRO.2018.2853729>.
- VDI/VDE, 2008: VDI/VDE 2634 Optische 3D-Messsysteme. VDI/VDE Richtlinien 2008, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Germany, 2008, Blatt 1-3.