
SCOUT3D – Ein Unterwasserlaserscanner für mobile Kartierung

Michael BLEIER, Joschka VAN DER LUCHT und Andreas NÜCHTER

Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt einen neu entwickelten Unterwasserlaserscanner kombiniert mit einem auf GNSS basierenden System zur Bestimmung der Trajektorie vor. Dies ermöglicht es, von einem Boot aus, den Grund oder Objekte in flachen Gewässern zu kartieren. Das System verfügt über eine Über- und eine Unterwasserkomponente. Über Wasser werden zwei kostengünstige Multiband-GNSS-Empfänger mit einer Antennenbasislinie von einem Meter für die RTK-Positionierung mit Kurswinkel verwendet. Die kompletten sechs Freiheitsgrade der Positionierung werden durch die Fusionierung der Satellitennavigationsdaten und einer MEMS-basierten INS bestimmt. Die 3D-Daten werden in Wasser mit einem Structured-Light-Scanner erfasst, der aus einer lichtempfindlichen Unterwasserkamera und einem grünen Kreuzlinienlaserprojektor besteht. Es wird die Entwicklung des Systems und die verwendeten Hardwarekomponenten beschrieben und erste Ergebnisse präsentiert. Hierzu wurde ein großes Testobjekt in einem Wassertank sowohl von einem Stativ aus, als auch von einer bewegten, schwimmenden Plattform aus gescannt. Eine Auswertung der entstanden Punktwolken findet durch einen Vergleich mit in der Szene platzierten Prüfkörpern und in Luft erzeugten Referenzscans der Testobjekte statt.

1 Einleitung

Für die hochauflösende und präzise Digitalisierung von kleinen Objekten bis hin zu ganzen Regionen am Land kann auf eine Vielzahl gut beherrschter Standardmethoden wie Laserscanning oder 3D Modellierung durch photogrammetrische Auswertung zurückgegriffen werden. Im Wasser ist die Anwendung der gleichen Messprinzipien allerdings mit Herausforderungen verbunden und eine komplexe Aufgabenstellung. Dies ist zum einen bedingt durch den hohen logistischen Aufwand, Systeme im Wasser einzusetzen und an den Messort zu bringen. Zum anderen ergeben sich durch die physikalischen Eigenschaften des Mediums Wasser, wie beispielsweise Absorption, Einschränkungen und die Effekte des Mehrmediengangs müssen berücksichtigt werden.

Auf einer großen Skala existieren nur niedrig aufgelöste Modelle von Seen und Ozeanen der Erde. Öffentlich verfügbare Datenquellen, wie der General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO, 2020), haben eine typische Rasterauflösung von 1 km und an vielen Stellen sind diese Daten interpoliert und die tatsächlich erreichte Auflösung ist niedriger (BECKER ET AL., 2009). Der GEBCO wird hierbei von zur Verfügung gestellten Messkampagnen von Schiffen als auch Satellitenmissionen gebildet. Hochauflösende bathymetrische Daten werden hierbei allerdings nur durch Fächerecholot erzielt, womit nur ein kleiner Teil der Wasserflächen abgedeckt ist. Einige kleinere Seen wurden mit luftbasierten Laserscannern und Fächerecholot hochauflösend vermessen. Beispielsweise wurde der 536 km² große Bodensee im Projekt

Tiefenschärfe mit einer Punktdichte von bis zu 40 Punkten pro Quadratmeter erfasst (STEINBACHER ET AL., 2015).

Ebenso ist auf einer kleinen Skala die präzise Erfassung von kleinen Objekten und Kartierung der Umgebung im Wasser herausfordernd. Typische Messorte im Wasser sind schwierig erreichbar und die Positionierung des Messsystems im Wasser ist zeitaufwändig und vor allem bei größeren Tiefen kostenintensiv. Häufig werden Unterwasservermessungsprojekte mit Sonarsensoren durchgeführt aufgrund der hohen erzielbaren Reichweite und Robustheit der Messung gegenüber Trübheit. Allerdings benötigen manchen Anwendungen, wie beispielsweise archäologische Dokumentation (MENNA ET AL., 2018), eine höhere Auflösung und Genauigkeit. Beispielsweise sind Archäologen daran interessiert Fragmente von versunkenen Schiffen, wie Planken des Rumpfs, genau zu erfassen, um Rückschlüsse darauf zu erhalten welche Teile zusammenpassen. Eine Bergung der Artefakte aus dem Wasser stellt hierbei immer eine Veränderung der Fundlage dar, da sich das Holz durch die Trocknung verformt oder das Fundstück beschädigt wird. Aus diesem Grund ist eine Dokumentation und 3D Erfassung direkt am Fundort im Wasser interessant. Die hierfür benötigte Genauigkeit macht optische System interessant für die 3D Erfassung im Wasser trotz eingeschränkter Reichweite aufgrund von Absorption und Trübheit.

Darüber hinaus nimmt der Bedarf an 3D Erfassung für industrielle Zwecke, wie die Inspektion von Schweißnähten (EKKELE ET AL., 2015) oder die Vermessung von Pipelines (JACOBI & KARIMANZIRA, 2014), zu. Dies hängt damit zusammen, dass das Meer zunehmend die Rolle als wichtige Quelle für Energiegewinnung als auch Rohstoffgewinnung und -förderung einnimmt. Für den sicheren und effizienten Betrieb von Offshore-Windparks oder Bohrplattformen ist eine regelmäßige Inspektion notwendig. Zusätzlich müssen alle Bauteile, die im Meer installiert werden, an Land passgenau gefertigt werden, da eine Anpassung oder Modifikation im Wasser sehr schwierig und teuer ist. Deshalb ist für den Aufbau von Rohrleitungssystem für beispielsweise Erdöl- und Erdgasförderung präzise Vermessung nötig. Um eine dichte Verbindung zwischen Anschlussstellen von Pipelines herzustellen, werden angepasste Verbindungsstücke eingesetzt, die auch leichte Verformungen des Rohrleitungssystems durch Temperatur oder Druck des Fluids ausgleichen können. Um diese Passstück anfertigen zu können, ist allerdings eine präzise Messung der relativen Lage und Orientierung der Anschlussstellen vorausgesetzt.

Auch für wissenschaftliche Zwecke wie die Beobachtung und Erkundung von Meereshabitaten werden 3D Datenerfassungsmethoden eingesetzt. Beispielsweise untersuchen Meeresbiologen die Entwicklung von Korallenriffen, da dies Aufschluss über den Gesundheitszustand des marinen Ökosystems gibt. Ein Indikator für verschiedene Spezies ist hierbei die geometrische Komplexität der Korallenformationen. Traditionell wird dieser Parameter manuell mit Schnurmaßen bestimmt. Zunehmend setzen Biologen hier aber auch Structure from Motion (SfM) Techniken ein, um 3D Modelle von Riffen zu erzeugen (BURNS ET AL., 2015). Auf diese Weise können mit preiswertem Equipment größere Flächen des Bewuchses am Boden digitalisiert werden und die gleichen Indikatoren von den 3D Daten extrahiert werden, aber mit höherer lokaler Auflösung. Auf diese Weise können Rückschlüsse über Diversität der Spezies gewonnen werden als auch Entwicklung und Ausbreitung von Krankheiten verfolgt werden. Einfach einsetzbare und preiswerte Technologie für Dokumentation im Wasser hat hier direkte Auswirkungen auf die Möglichkeiten Unterwasserhabitate zu beobachten und zu erforschen.

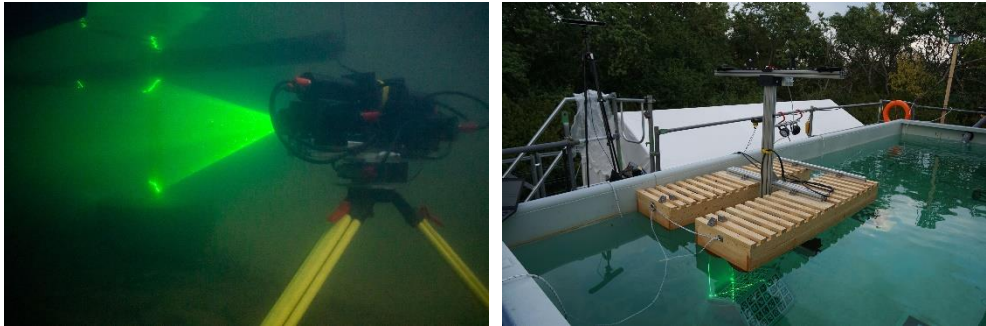


Abb. 1: Entwickeltes System mit Structured-Light-Scanner. Links: Unterwasserscanner mit Kreuzlinienprojektor auf Stativ in einem natürlichen Gewässer. Rechts: Unterwasserscanner montiert an einem Floß für mobiles Scannen mit Satellitennavigation.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Unterwasserlaserscannersystems für mobiles Scannen von einem Boot. Dieser Ansatz ist dazu gedacht, größere Flächen in flachem Wasser zu erfassen. Typischerweise können im Wasser nur kleine Gebiete mit optischen Scannern erfasst werden aufgrund der limitierten Reichweite. Absorption und Trübheit reduzieren den nutzbaren Scanabstand in der Regel in natürlichen Gewässern auf wenige Meter. Aus diesem Grund ist es notwendig, den Scanner zu bewegen, um größere Gebiete oder Objekte zu erfassen. Diese ist beispielsweise für Sedimentanalyse von Binnengewässern relevant.

Im Folgenden wird ein Unterwasserscanner für statische und mobile Aufnahmen im Wasser vorgestellt. Abbildung 1 zeigt im linken Bild den Scanner montiert auf einem Stativ. Hier wird der Scanner motorisch um die Hochachse gedreht, um 3D Scans zu erzeugen. Rechts ist der Scanner abgebildet montiert an ein Floß. Der Scanner ist nach unten gerichtet im Wasser. Über Wasser werden zwei Global Navigation Satellite System (GNSS) Multibandempfänger für Positionsbestimmung relativ zu einer Basisstation im Real-time Kinematic (RTK) Verfahren eingesetzt. Durch Fusion mit Trägheitsnavigation anhand einer Inertial Measurement Unit (IMU) werden die vollen 6 Freiheitsgrade der Pose des Messsystems bestimmt.

2 Stand der Forschung

Passive optische Methoden, wie SfM, werden regelmäßig für die 3D Erfassung von Unterwasserumgebungen eingesetzt (JORDT-SEDLAZECK & KOCH, 2013; MENNA ET AL. 2018; BURNS ET AL., 2015). Unterwasserphotogrammetrie mit codierten Marken wird in der Industrie für präzise Vermessung, beispielsweise von Pipelineanschlussstellen, eingesetzt. Dieser Ansatz benötigt eine große Anzahl kalibrierter mit Marken versehener Marken die im Messvolumen mit Hilfe eines Remotely Operated Vehicles (ROV) ausgelegt werden müssen. Kommerzielle optische Unterwasserscanner und in Forschungsprojekten entwickelte Demonstratoren werden für verschiedene Aufgaben, wie die Steuerung von Unterwasserrobotern (PALOMER ET AL., 2018) und die Inspektion mit Hilfe von Unterwasserrobotern (TETLOW & SPOURS, 1999) eingesetzt. Zunehmend werden auch verschiedene Messverfahren, wie optische Bildgebung und Sonaraufnahmen, miteinander kombiniert, um die Vorteile

der einzelnen Verfahren zu kombinieren und detailliertere und vollständigere 3D Modelle zu erzeugen (KALWA ET AL., 2016). Ein Überblick über aktive optische Unterwasserscanner ist in (CASTILLÓN ET AL., 2019) zu finden.

Verschiedene Arten von Musterprojektion wurden für die 3D Erfassung im Wasser erfolgreich eingesetzt. Streifenlichtprojektion wurde eingesetzt, um sehr hochauflösende Scans von kleinen Objekten zu erzeugen (BRÄUER-BURCHARDT, 2016). Trotz der limitierten Beleuchtungsstärke von handelsüblichen Videoprojektoren konnten Messabstände von über 1 m in klarem Wasser demonstriert werden (BRUNO ET AL., 2011).

Unterwasserlaserscanner für größere Messabstände setzen häufig Linienlaserprojektoren mit hoher Leistung ein. Beispielsweise die kommerziell verfügbaren Linienlaserscanner der Firma 2G ROBOTICS (2020) bieten Messreichweiten von bis zu 10 m abhängig von den Wasserbedingungen. 3D Scans werden typischerweise dadurch erzeugt, dass der Scanner auf einem Drehgelenk rotiert oder mobil an einem Unterwasserfahrzeug eingesetzt wird.

Steuerbare Linienprojektionen haben den Vorteil, dass der Scanner nicht mechanisch rotieren muss, um eine flächige Aufnahme zu erzielen. CHI ET AL. (2016) und PALOMER ET AL. (2018) setzen hierfür Galvanometerprojektoren in einem Unterwassergehäuse mit flacher Scheibe ein. Da hier die Projektion in einem flachen Winkel auf die Fläche des Medienwechsels auftrifft kann die Laserprojektion nicht durch eine Ebene beschrieben werden und muss explizit durch ein physikalisches Modell beschrieben werden. PALOMER ET AL. (2018) nutzen hierfür ein Kegelstumpfmmodell, um die Projektion im Wasser zu beschreiben. Ein anderer Ansatz ist einen Linienlaserprojektor in einem Gehäuse mit zylinderförmigem Fenster zu rotieren. Wird die Drehachse zentriert und der Laser so ausgerichtet, dass er immer senkrecht zur Oberfläche des Medienübergangs auftrifft, kann im Wasser eine ebene Linienprojektion erzielt werden. Dies wird beispielsweise im UX-1 Unterwasserroboter für die Erkundung von Bergbauschächten eingesetzt (MARTINS ET AL., 2018). Ähnlich setzt KRAKEN ROBOTICS (2020) in ihrem SeaVision System rotierende Linienlaser mit roter, grüner und blauer Wellenlänge ein, um farbige 3D Scans zu erzeugen. Verzerrungen der Linienprojektion können hier auch modelliert werden indem die Linienprojektion als inverse Linienkamera betrachtet wird und beispielsweise radiale Verzerrungsparameter hinzugefügt werden.

Kalibriert werden diese Systeme typischerweise anhand von Kalibrierstrukturen wie planaren Schachbrettmustern oder speziellen 3D Strukturen mit optischen Marken. Häufig wird dabei ein Teil der Parameter auch in Luft bestimmt, um nur eine reduzierte Parameterbestimmung in Wasser durchführen zu müssen. Manche Parameter lassen sich auch durch Selbstkalibrierungsansätze bestimmen (BLEIER & NÜCHTER, 2017).

Während die meisten verfügbaren Unterwasserlaserscanner auf Triangulation basieren, gibt es mit den Systemen der Firma 3D AT DEPTH (2020) auch erste Systeme auf dem Markt, die Lichtlaufzeitmessungen durchführen. STEMMLER ET AL. (2019) entwickelten eine Unterwasserlaserscanner, der das empfangene Signal der reflektierten Energie aufzeichnet und digitalisiert (Full Waveform Analyse). Dies ermöglicht eine effektive Unterdrückung der Rückstreuung an Partikeln im Sensorsignal.

3 Systemkomponenten

Der Aufbau des entwickelten Unterwasserlaserscannersystems ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Daten wurden mit einem selbstgebauten Unterwasser-Laserscansystem basierend auf Erfassung mit strukturiertem Licht (Kreuzlinienprojektor) erfasst. Hochleistungs-Laserlinienprojektoren wurden ausgewählt aufgrund der hohen Lichtabsorption, insbesondere bei trübem Wasser. Beim Scannen in Oberflächenwasser ist außerdem Umgebungslicht von der Sonne ein Problem. Die Laserprojektion muss so hell sein, dass ein ausreichender Kontrast zur Umgebungsbeleuchtung erzielt wird. Deshalb ist es notwendig, hochempfindliche Kameras mit großem Dynamikbereich einzusetzen. Wir wählen ein Kreuzlinien-Lasermuster, da dies das Scannen durch Bewegung in verschiedene Raumrichtungen ermöglicht und Mehrfachmessungen erzielt werden können.

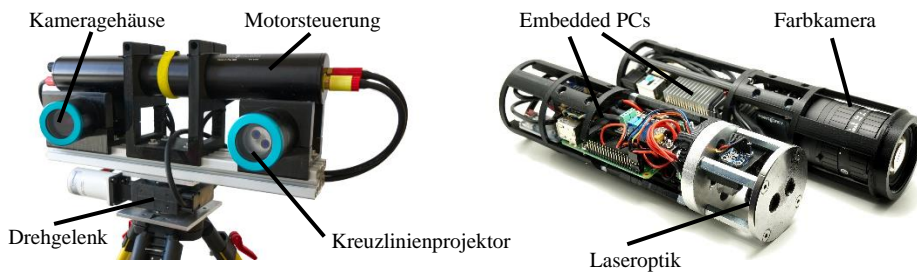


Abb. 2: Entwickelter Unterwasserscanner. Links: Kreuzlinienscanner montiert auf einem Drehgelenk. Rechts: Laserprojektorbaugruppe und Kamerasensorik.

3.1 Unterwasserlaserscanner

Der verwendete Unterwasser-Laserscanner mit strukturiertem Licht besteht aus zwei Gehäusen mit ebenen Glasfenstern, von denen das eine die Kamera und das andere den Kreuzlinien-Laserprojektor enthält. Die beiden Gehäuse sind auf einem 50 cm langen Aluminiumprofil montiert. Halterungen für die Gehäuse wurden durch 3D-Druck hergestellt. Das Kameragehäuse ist in einem Winkel von 20° in Richtung des Projektors gedreht. Darüber ist ein Gehäuse montiert, das Motorsteuerelektronik und einen Netzschalter enthält, um den Unterwasserscanner über ein Unterwasserkabel mit der Oberfläche zu verbinden. Der Scanner befindet sich auf einem Robotergelenk und einem 1:50-Schneckengetriebe, das von einem Schrittmotor angetrieben wird. Dadurch kann der Scanner gedreht werden, um 360-Grad-Scans aufzunehmen. Zur Messung des Drehwinkels des Scanners wird ein in Epoxidharz eingeschlossener Magnet-Encoder verwendet. Alle Gehäuse verfügen über einen Embedded-PC mit Netzwerkschnittstelle. Das Robot Operating System (ROS) wird als Middleware für Sensorschnittstellen, Protokollierung und Datenverarbeitung verwendet. Alle Embedded-PCs werden mit NTP zeitsynchronisiert. Zur Synchronisation der Kamera mit dem Laserprojektor wird ein Triggerimpulssignal verwendet.

Als Kamera kommt eine Farbkamera mit einem Sony Pregius IMX249 Bildsensor mit 1920×1200 Pixeln und einer Bildrate von 41 Hz zum Einsatz. Der Kreuzlinien-Projektor besteht aus zwei Powell-Laserlinienoptik und den Laserdioden. Bei den Lasern handelt es sich um

zwei 1W grüne Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 525nm, die an einem Aluminiumkühlkörper befestigt sind. Die Laserausgangsleistung wird durch zwei Laserdiodentreiber gesteuert, die über PWM-Signale eingestellt werden können, die von einem an einen Embedded-PC angeschlossenen Mikrocontroller erzeugt werden. Die beiden Laserlinien projizieren ein Laserkreuz, das aus zwei senkrechten Linien in der Szene besteht. Der Fächerwinkel der Laserlinien beträgt 45 Grad, der in Wasser auf ungefähr 32 Grad reduziert wird. Die Laser werden mit Triggerimpulssignalen synchron zum Kameraverschluss angesteuert. Es wird eine abwechselnde Projektionsfolge der einzelnen Laser verwendet, so dass jedes von der Kamera aufgenommene Bild nur eine der beiden Laserlinien enthält.

Für mobile Kartierung wurde ein zweites Scannersystem aufgebaut. Hier kommt statt einer Farbkamera eine monochrome Kamera mit einer Bildaufnahmefrequenz von 163 Hz und sonst gleichen Daten zum Einsatz. Des Weiteren wurde ein grüner Bandpassfilter vor der Kamera installiert, um den Kontrast der grünen Laserlinie gegenüber dem Hintergrund zu erhöhen. Die Komponenten sind in Abbildung 3 zu sehen.



Abb. 3: Scannerkomponenten. Links: Kreuzlinienprojektor. Rechts: Monochrome Kamera mit Farbfilter (grüner Bandpassfilter).

3.2 Aufbau für mobile Kartierung

Für mobile Aufnahmen wird der Scanner mit einem Satellitennavigationssystem kombiniert. Hierfür werden zwei preisgünstige u-blox ZED-F9P Multiband-GNSS-Empfänger mit Patchantennen eingesetzt. Diese Empfänger stellen Rohdatenmessungen für GPS, GLONASS, Galileo und BeiDou mit 20 Hz zur Verfügung. Zwei Empfänger werden verwendet, um auch direkt den Kurswinkel berechnen zu können. Zusätzlich wird eine Xsens Mit-300 MEMS IMU mit einer Messfrequenz von 100 Hz integriert.

Antenne, IMU und Unterwasserscanner werden starr über Aluminiumprofile verbunden. Der Aufbau ist in Abbildung 4 abgebildet. Eine GNSS Basisstation wird in der Nähe des Einsatzorts aufgebaut. Über eine Funkverbindung werden Korrekturdaten direkt an die Empfänger auf dem mobilen Aufbau gesendet. Die integrierte RTK Lösung der u-blox Empfänger stellt damit Positionsdaten mit 10 Hz zur Verfügung. Nachverarbeitung der Daten wird mit RTKLIB durchgeführt, wodurch Positionslösungen mit der vollen Frequenz von 20Hz berechnet werden können. Bei guten Empfangsbedingungen ist so eine relative Positionsgenauigkeit im Zentimeterbereich erreichbar. Zur Bestimmung der vollen 6 Freiheitsgrade der Pose des Aufbaus wird eine lose gekoppelte Fusion zwischen der Orientierung bestimmt aus der IMU und den GNSS Positionen durchgeführt. Hierbei wird auch der Offset des Kurswinkels ausgeglichen, da sich die IMU gegen den magnetischen Nordpol referenziert und nicht den geographischen Nordpol.

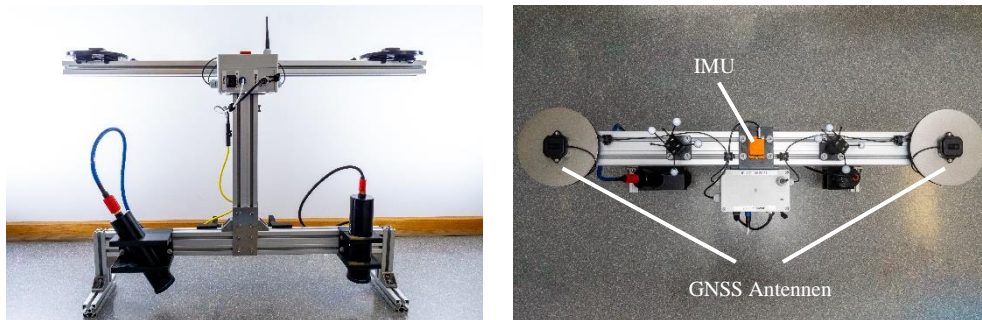


Abb. 4: Aufbau für mobile Kartierung. Links: Unterwasserscanner starr verbunden mit Satellitennavigationskomponenten. Rechts: GNSS Antennen und IMU für Trägheitsnavigation.

4 Datenverarbeitung und Kalibrierung

Signifikante Herausforderungen für das 3D-Laserscanning unter Wasser liegen in der Bildverarbeitung und der Extraktion der Laserkurven. Partikelrückstreuung erschwert die automatische Extraktion der Laserlinien, dies erfordert die Erforschung verbesserter Bildverarbeitungsalgorithmen zur robusten Extraktion der Laserkurven. Für die Extraktion der Laserlinien im Bild wird ein Liniendetektor, der auf der Arbeit zu Linienextraktion von STEGER (1998) basiert, verwendet. Die Idee des Algorithmus besteht darin, Kurven in dem Bild zu finden, die ein charakteristisches 1D-Linienprofil in der Richtung senkrecht zur Linie aufweisen, d. H. einen verschwindenden Gradienten und eine hohe Krümmung. Da der Liniendetektor die Berechnung von rechenintensiven Faltungsfiltren erfordert, segmentieren wir das Bild zunächst anhand von Farbinformationen und Intensitätsschwellwerten. Auf diese Weise muss der Linienextraktionsalgorithmus nur für Teile des Bildes berechnet werden, was die Verarbeitungszeit erheblich reduziert.

Der Unterwasser-Laserscanner wird mit der gleichen Methode in Luft und Wasser kalibriert. Die Kamera wird nach der Methode von ZHANG (2000) mit einer 3D-Kalibrierstruktur mit AprilTags (WANG & OLSON, 2016) als Bildmarkierungen kalibriert. Die verwendete Struktur ist in Abbildung 5 zu sehen. Der Vorteil hierbei ist, dass Kalibrierungspunkte automatisch extrahiert werden, auch wenn nur ein Teil der Struktur im Bild sichtbar ist. Im Allgemeinen muss die Brechung zusätzlich explizit berücksichtigt werden. Nur unter gewissen Aufnahmebedingungen ist der Fehler im Objektraum bei impliziter Modellierung vertretbar (KAHMEN ET AL., 2019). Zur Kalibrierung des Laserprojektors müssen die Parameter der Laserebene relativ zum Ursprung des Kamerakoordinatensystems bestimmt werden. Zu diesem Zweck wird ein L-förmiges 3D-Kalibrierungsmuster verwendet, das aus zwei Ebenen mit AprilTags besteht. Dies ermöglicht die Bestimmung der Laserebene aus einem einzelnen Bild. Die beiden Platten wurden hierbei durch Direktdruck auf Floatglas mit einer Druckgenauigkeit von ca. 0,1 mm erstellt. Die relative Lage der beiden Muster wird zusätzlich zur Verifikation im Kalibrierprozess bestimmt.

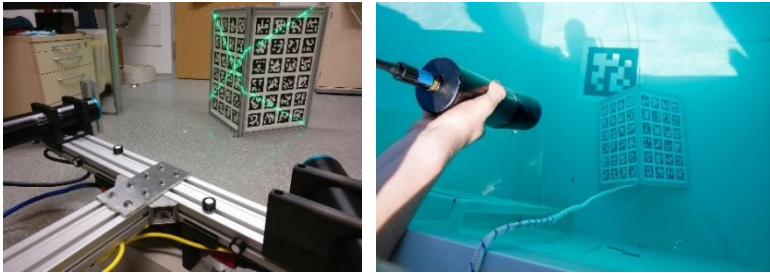


Abb. 5: Kalibrierstruktur aus zwei Floatglasplatten mit AprilTag Markern.

Für das Scannen vom Stativ ist die Kalibrierung der Rotationsachse des Drehgelenks ein entscheidender Einflussfaktor für die Genauigkeit der Messung. Das zylindrische Kamera- und Lasergehäuse ist in der Rotation um die Längsachse nicht fixiert, weshalb insbesondere hier Abweichungen auftreten. Es wird sowohl der Abstand des Kamerazentrums zur Rotationsachse, als auch die Verdrehung um die Längsachse und die Vertikalachse bestimmt. Zunächst wird eine initiale Schätzung der Parameter bestimmt. Dies wird durchgeführt indem der Scanner vor die AprilTag-Kalibrierstruktur gestellt wird und mit dem Drehgelenk rotiert wird. Relativ zum Kalibriermuster kann so die Bewegung der Kamera durch Schätzung der äußeren Orientierung der Kamera gegen das Kalibrierobjekt bestimmt werden. Da die Struktur bei Drehung des Scanners nur in einem kleinen Winkelbereich im Sichtbereich der Kamera bleibt, können die Parameter der Drehachse mit dieser Methode allerdings nicht ausreichend genau bestimmt werden. Im 3D-Scan ergeben sich mit der initialen Schätzung ab einer Entfernung von $> 1,5$ Meter grobe Fehler von mehreren Zentimetern im Scan. Dies ist im linken Bild der Abbildung 6 zu sehen. Aus diesem Grund werden die Kalibrierparameter in einem zweiten Schritt weiter optimiert. Hierzu wird eine Optimierung anhand der erzeugten Punktwolke durchgeführt und die Mehrfachmessungen durch die beiden Laserlinien ausgenutzt. Ein 360 Grad Scan wird mit dem Unterwasserscanner durchgeführt. Dann wird die erzeugte Punktwolke in die durch die zwei Laserlinien erzeugten Scans geteilt. Die Abweichungen der Punktmessungen dieser beiden Scans soll bei statischer Umgebung klein sein bzw. verschwinden. Um die Parameter der Drehachse zu finden, optimieren wir eine ähnliches Fehlermaß wie der Iterative Closest Point Algorithmus (ICP). Die Drehachsenparameter welche die, anhand einer Nächste-Nachbar-Suche ermittelte, Punkt-zu-Punkt Distanz zwischen den beiden Scans der Einzellinien minimiert wird gesucht. Hierzu wird eine lokale Optimierung mit Hilfe der Methode von Powell verwendet. Im rechten Bild von Abbildung 6 ist das 3D-Scan Ergebnis mit dem optimierten Parametersatz dargestellt.

Zur Kalibrierung der relativen Orientierung der Kamera zu den GNSS Antennen und der IMU wurden Kreismarken an den Aluminiumprofilen angebracht, wie beispielsweise die Marken auf dem Aluminiumprofil des Scanners im linken Bild von Abbildung 5. Hierbei wird zunächst die Orientierung der Kamera relativ zu Kreismarken auf dem Unterwasserscanner bestimmt. Davon getrennt werden Kreismarken am Satellitennavigationssystem angebracht und die Orientierung der IMU bestimmt. Das getrennte Einmessen der Kreismarken auf beiden Teilen des Systems hat den Vorteil, dass wenn das System für den Transport zerlegt werden muss oder der Abstand zwischen Unterwasserscanner und Antennensystem verändert werden soll, muss nur die relative Lage der Kreismarken zwischen den beiden Systemen neu eingemessen werden.

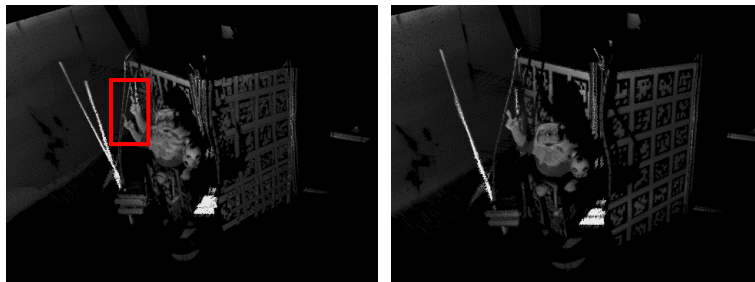


Abb. 6: Ausschnitt aus einem Unterwasserscan von einer Testszene in ca. 2 m Entfernung. Links: Ergebnis mit initialen Parametern. Rechts: Optimiertes Ergebnis.

5 Ergebnisse

Experimente wurden in einem 40 m^3 großen Testtank, der aus einem Abrollcontainer aufgebaut ist, durchgeführt. Ein Testobjekt der Größe $2 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ist am Boden des Tanks platziert. Das aus Plastikrohren und Aluminiumprofilen erstellte Objekt ist in Abbildung 7 zu sehen. In Luft wurde ein Referenzscan mit einem Riegl VZ-400 Laserscanner erstellt.

Es werden Aufnahmen mit dem Scanner auf einem Stativ als auch Aufnahmen mit dem mobilen Aufbau mit Satellitennavigation durchgeführt. In Abbildung 8 sind Ergebnisse des Scannens vom Stativ mit dem Scanner ca. 2 m vor dem Testobjekt abgebildet. Mit dem Scanner können in klarem Wasser Reichweiten von über 8 m erreicht werden. Die ca. 6 m vom Scanner entfernte Rückwand des Containers wird hier im Scan noch erfasst. Im Vergleich von gescannten Testobjekten mit Referenzscans ergeben sich im Nahbereich von ca. 1-2 m Abweichungen im Millimeterbereich und in größerer Entfernung im Zentimeterbereich. Die Abweichungen im Experiment zwischen Referenzscan des Testobjekts und dem Unterwasserscan ist unten rechts in Abbildung 8 visualisiert.

Erste Ergebnisse erzeugt durch mobiles Scannen im Wassertank sind in Abbildung 9 zu sehen. Hier ergeben sich noch größere Abweichungen aufgrund des schlechten GNSS Empfangs im Testtank. Durch die Abschattung des Himmels durch den Containerdeckel ergeben sich hier schlechte Positionsmessungen.

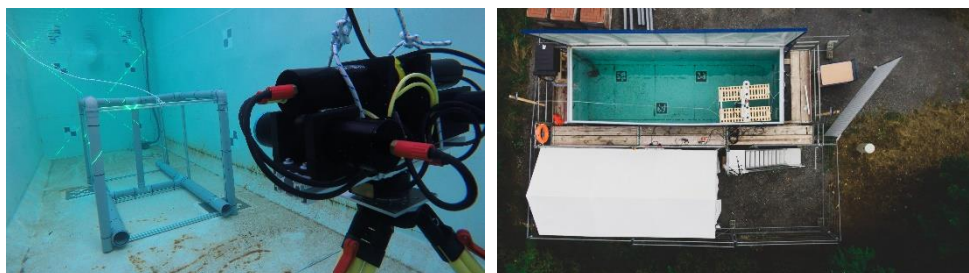


Abb. 7: Statisches und mobiles Scannen eines Testobjekts. Links: Scannen des Testobjekts von einem Stativ aus. Rechts: Mobiler Aufbau mit Floß im Wassertank.

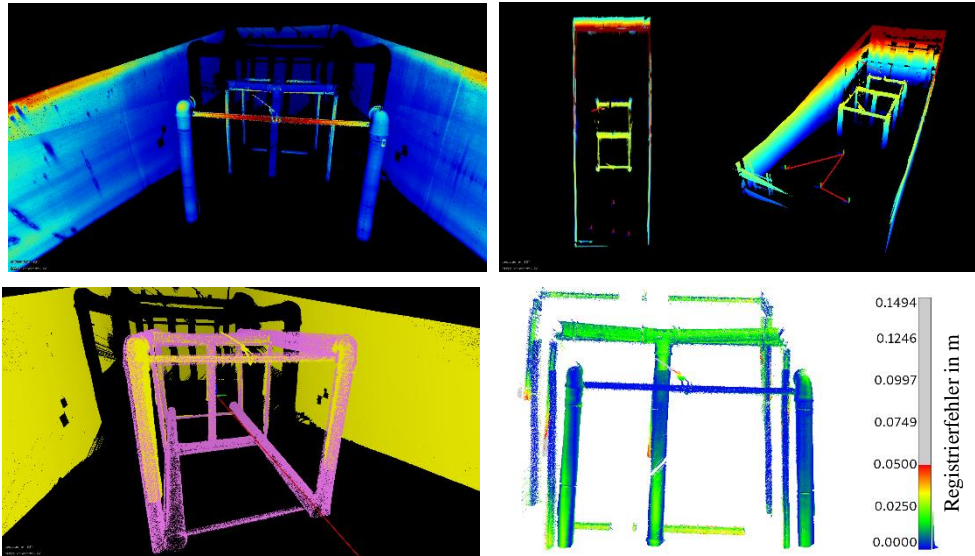


Abb. 8: Punktwolkenergebnisse der Stativaufnahmen. Oben links: Punktwolke eingefärbt nach Intensität. Oben rechts: Scan des Testtanks aus vier Einzelscans. Unten links: Registrierung eines Referenzscans dargestellt in Rosa mit dem Unterwasserscan in gelber Farbe. Unten rechts: Abweichung zwischen Referenz- und Unterwasserscan.

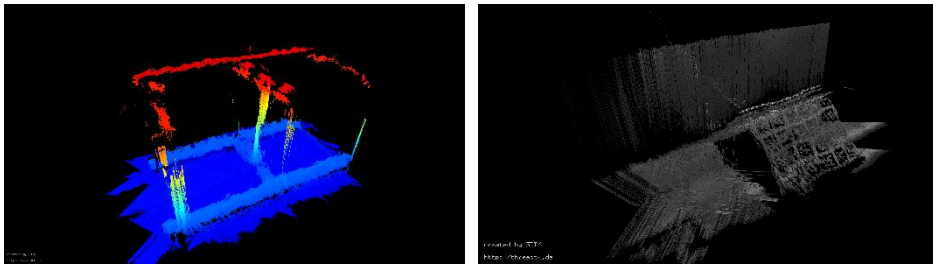


Abb. 9: Erste Ergebnisse von dem mobilen Scannen im Testtank. Fehler in der Trajektorie durch Abschattung des GNSS Empfangs durch den Containerdeckel.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Unterwasserlaserscannersystem und dessen Anwendung für mobile Kartierung in Kombination mit Satellitennavigation beschrieben. Die Genauigkeit der Messung wird hierbei im Speziellen durch die Kalibrierung des Systems beeinflusst. Hierbei wurde gezeigt, wie bessere Parameter durch Optimierung des Punktwolkenergebnis gefunden werden können. Die ersten Ergebnisse, erstellt durch mobiles Scannen, zeigen bereits ein vielversprechendes Ergebnis, allerdings ist hier eine weitere Verbesserung der Trajektorienbestimmung bei schlechten Aufnahmebedingungen notwendig.

Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert aus dem Projekt „Mobile Unterwasserkartierung vom Schiff zur hochpräzisen 3D-Erfassung mittels Laserscannen“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) unter der Fördernummer ZF4117504DF8 nach einem Beschluss des Deutschen Bundestages.

Literatur

- 2G Robotics (2020): *ULS-500 underwater laser scanner*. <http://www.2grobotics.com/products/underwater-laser-scanner-uls-500/>.
- 3D at Depth (2020): *SL1 subsea lidar*. <https://www.3datdepth.com/product/sl1-lidar-laser>.
- Becker, J. J., Sandwell, D. T., Smith, W. H. F., Braud, J., Binder, B., Depner, J. L., ... & Ladner, R. (2009): *Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30_PLUS*. *Marine Geodesy*, 32(4), S. 355-371.
- Bleier, M., & Nüchter, A. (2017): *Low-cost 3D Laser Scanning in Air or Water Using Self-calibrating Structured Light*. Proceedings of the 7th ISPRS International Workshop 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (3D-ARCH), S. 105-112.
- Bräuer-Burchardt, C., Heinze, M., Schmidt, I., Kühmstedt, P., & Notni, G. (2016): *Underwater 3D surface measurement using fringe projection based scanning devices*. *Sensors*, 16(1), 13.
- Bruno, F., Bianco, G., Muzzupappa, M., Barone, S., & Rationale, A. V. (2011): *Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(4), S. 508-518.
- Burns, J. H. R., Delparte, D., Gates, R. D., & Takabayashi, M. (2015): *Utilizing underwater three-dimensional modeling to enhance ecological and biological studies of coral reefs*. Proceedings of the 1st ISPRS International Workshop Underwater 3D Recording and Modeling, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W5, S. 61-66.
- Castillón, M., Palomer, A., Forest, J., & Ridao, P. (2019): *State of the Art of Underwater Active Optical 3D Scanners*. *Sensors*, 19(23), 5161.
- Chi, S., Xie, Z., & Chen, W. (2016): *A laser line auto-scanning system for underwater 3D reconstruction*. *Sensors*, 16(9), 1534.
- Ekkel, T., Schmik, J., Luhmann, T., & Hastedt, H. (2015): *Precise laser-based optical 3D measurement of welding seams under water*. Proceedings of the 1st ISPRS International Workshop Underwater 3D Recording and Modeling, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W5, S. 117-122.
- GEBCO (2020): *The general bathymetric chart of the oceans*. <https://www.gebco.net/>.

- Jacobi, M., & Karimanzira, D. (2014): *Multi sensor underwater pipeline tracking with AUVs*. In Proceedings of 2014 OCEANS - St. John's. IEEE.
- Jordt-Sedlazeck, A., & Koch, R. (2013): *Refractive structure-from-motion on underwater images*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, S. 57-64.
- Kahmen, O., Rofallski, R., Conen, N., & Luhmann, T. (2019): *On Scale Definition Within Calibration of Multi-camera Systems in Multimedia Photogrammetry*. Proceedings of the 2nd ISPRS International Workshop Underwater 3D Recording and Modelling, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W10, S. 93-100.
- Kalwa, J., Tietjen, D., Carreiro-Silva, M., Fontes, J., Brignone, L., Gracias, N., ... & Eckstein, S. (2016): *The European Project MORPH: Distributed UUV systems for multimodal, 3D underwater surveys*. Marine Technology Society Journal, 50(4), S. 26-41.
- Kraken Robotics (2020): *The Kraken Robotics SeaVision subsea 3D laser imaging system*, <https://krakenrobotics.com/products/seavision/>.
- Martins, A., Almeida, J., Almeida, C., Dias, A., Dias, N., Aaltonen, J., ... & Vörös, C. (2018): *UX 1 system design - A robotic system for underwater mining exploration*. In 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, S. 1494-1500.
- Menna, F., Agrafiotis, P., & Georgopoulos, A. (2018): *State of the art and applications in archaeological underwater 3D recording and mapping*. Journal of Cultural Heritage, 33, S. 231-248.
- Palomer, A., Ridao, P., Youakim, D., Ribas, D., Forest, J., & Petillot, Y. (2018): *3D laser scanner for underwater manipulation*. Sensors, 18(4), 1086.
- Steger, C. (1998): *An unbiased detector of curvilinear structures*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 20(2), S. 113-125.
- Steinbacher, F., Bodmer, T., & Baran, R. (2015): *Gewässervermessung aus der Luft-Tiefenschärfe am Bodensee und die neuen Möglichkeiten der ökologischen Bewertung von Gewässern*. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 67(11-12), S. 441-446.
- Stemmler, S., Werner, C. S., & Reiterer, A. (2019): *Development of a time-of-flight laser scanning system for underwater applications*. In Proceedings of SPIE 11150, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019, 111500M.
- Tetlow, S., & Spours, J. (1999): *Three-dimensional measurement of underwater work sites using structured laser light*. Measurement Science and Technology, 10(12), S. 1162-1167.
- Wang, J., & Olson, E. (2016, October). *AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection*. In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, S. 4193-4198.
- Zhang, Z. (2000). *A flexible new technique for camera calibration*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11): 1330-1334.

Autoren

Bleier, Michael

Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Informatik VII: Robotik und Telematik

michael.bleier@uni-wuerzburg.de

van der Lucht, Joschka

Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Informatik VII: Robotik und Telematik

joschka.lucht@uni-wuerzburg.de

Nüchter, Andreas

Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Informatik VII: Robotik und Telematik

andreas.nuechter@uni-wuerzburg.de