

SCOUT3D – ein Unterwasser-Laserscanner für mobile Kartierung

SCOUT3D – An Underwater Laser Scanner for Mobile Mapping

Michael Bleier, Joschka van der Lucht, Andreas Nüchter

Dieser Beitrag stellt einen neu entwickelten Unterwasser-Laserscanner 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 im Wasser werden mit einem Structured-Light-Scanner erfasst, der aus einer lichtempfindlichen Unterwasserkamera und einem grünen Kreuzlinienlaserprojektor besteht. Es werden die Entwicklung des Systems und die verwendeten Hardwarekomponenten beschrieben und erste Ergebnisse präsentiert. Hierzu wurden Testobjekte 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. Die Experimente evaluieren Auflösungsvermögen sowie Genauigkeit der Scans.

Schlüsselwörter: Unterwasser, Laserscanning, mobile Kartierung

This publication describes the development of an underwater laser scanner system combined with a GNSS based localization system for trajectory estimation. The system consists of an under- and an above-the-water part and enables to scan the ground surface in shallow waters from a boat. Above water two GNSS antennas with a baseline of 1 meter are used to calculate the RTK-position and the heading angle. The full 6-DoF position is estimated by fusing the GNSS navigation data with a MEMS-based IMU. Underwater a self-developed structured light scanner, consisting of a low light underwater camera and a green cross line laser projector, is used for 3D mapping. In this publication the system is described and experiments were carried out for validation. Test objects are placed in a test tank and scanned with the underwater scanner from a tripod and a floating platform. The evaluation is performed by comparing the resulting point clouds with reference scans of the test objects acquired in air. The experiments are designed to determine the depth resolution and accuracy of the scanner.

Keywords: Underwater, laserscanning, mobile mapping

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 sie sich durch die physikalischen Eigenschaften des Mediums Wasser. Dabei müssen beispielsweise die Absorption und Einschränkungen durch die Effekte des Mehrmedienübergangs 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 durch Schiffe und durch Satellitenmissionen gebildet. Hochauflösende bathymetrische Daten werden hierbei allerdings nur durch Fächerecholote erzielt, damit wird jedoch nur ein kleiner Teil der Wasserflächen abgedeckt. Einige kleinere Seen wurden beispielsweise mit luftbasierten Laserscannern und Fächerecholoten hochauflösend vermessen. Der 536 km² große Bodensee wurde 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 zeitaufwendig und vor allem bei größeren Tiefen kostenintensiv. Aufgrund der hohen erzielbaren Reichweite und Robustheit der Messung gegenüber Trübheit werden Unterwasservermessungsprojekte häufig mit Sonarsensoren durchgeführt.

Allerdings benötigen manche Anwendungen, wie beispielsweise archäologische Dokumentationen /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 trotz der im Wasser eingeschränkten Reichweite aufgrund von Absorption und Trübheit interessant.

Darüber hinaus nimmt der Bedarf an 3D-Erfassung für industrielle Zwecke, wie die Inspektion von Schweißnähten /Ekkel et al. 2015/ oder die Vermessung von Pipelines /Jacobi & Karimanzira 2014/, zu. Dies hängt damit zusammen, dass das Meer zunehmend eine wichtige Rolle als Quelle zur Energie- und Rohstoffgewinnung 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, eine präzise Vermessung nötig. Um eine dichte Verbindung zwischen Anschlussstellen von Pipelines herzustellen, werden angepasste Verbindungsstücke eingesetzt. Um diese Passstück anfertigen zu können, ist allerdings eine präzise Messung der relativen Lage und Orientierung der Anschlussstellen vorausgesetzt. Typische Anforderungen sind hierbei Längenmessabweichungen kleiner 0,1 % und Winkelabweichungen kleiner als 0,5 Grad zwischen zwei Anschlussstellen.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Unterwasser-Laserscannersystems 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 Sedimentanalysen von Binnengewässern relevant.

Im Folgenden wird ein Unterwasserscanner für statische und mobile Aufnahmen im Wasser vorgestellt. *Abb. 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, montiert an ein Floß, abgebildet. Der Scanner ist nach unten gerichtet im Wasser. Über Wasser werden zwei Global-Navigation-Satellite-System-(GNSS)-Multibandempfänger

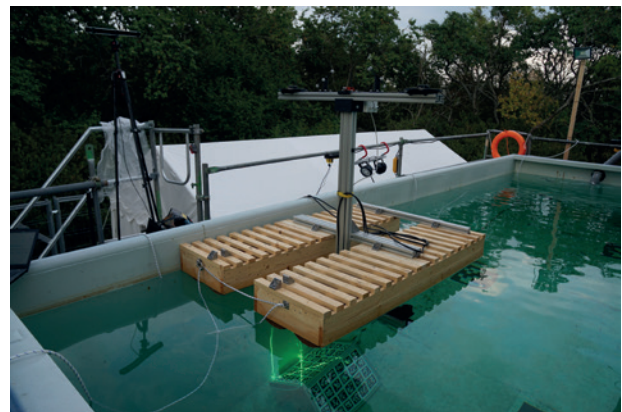
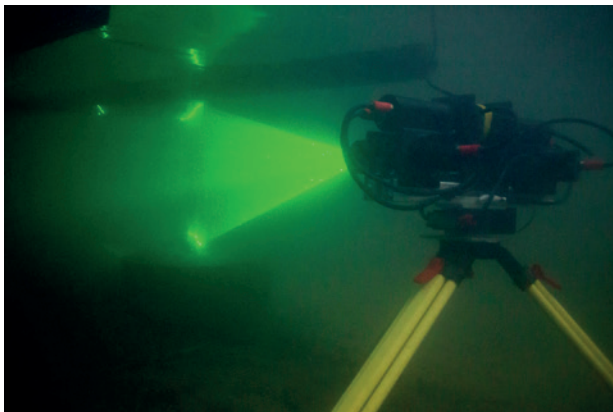


Abb. 1 | Entwickeltes System mit Structured-Light-Scanner. Links: Unterwasserscanner mit Kreuzlinienprojektor auf einem Stativ in einem natürlichen Gewässer. Rechts: Unterwasserscanner, montiert an einem Floß für mobiles Scannen mit Satellitennavigation.

ger für die 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 Structure from Motion (SfM), werden regelmäßig für die 3D-Erfassung von Unterwasserumgebungen eingesetzt /Jordt-Sedlazeck & Koch 2013/, /Menna et al. 2018/. 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 Strukturen, die im Messvolumen mithilfe eines Remotely Operated Vehicles (ROV) ausgelegt werden müssen. Kommerzielle optische Unterwasserscanner und in Forschungsprojekten entwickelte Demonstratoren werden für verschiedene Aufgaben, wie die Steuerung von Unterwasser-Manipulatoren /Palomer et al. 2018/ und die Inspektion mithilfe 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 Musterprojektionen wurden für die 3D-Erfassung im Wasser erfolgreich eingesetzt. Die Streifenlichtprojektion wurde verwendet, um sehr hoch auflösende 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/.

Unterwasser-Laserscanner für größere Messabstände setzen häufig Linienlaserprojektoren mit hoher Leistung ein. Beispielsweise bieten die kommerziell verfügbaren Linienlaserscanner der Firma /2G Robotics 2020/ 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 geometrisch-physikalisches Modell beschrieben werden. /Palomer et al. 2018/ nutzen hierfür ein Kegelstumpfmodell, 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 wer-

den. 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 Unterwasser-Laserscanner 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 einen Unterwasser-Laserscanner, der das empfangene Signal der reflektierten Energie aufzeichnet und digitalisiert (Full-Waveform-Analyse). Dies ermöglicht eine effektive Unterdrückung der Rückstreuung an Partikeln im Sensorsignal. Die Datenerhebung vom Flugzeug mittels Laserscanning-Verfahren wird erfolgreich für die Vermessung von Flachwasserzonen von Seen und die archäologische Dokumentation von Unterwasserstrukturen eingesetzt /Doneus et al. 2015/. Hierbei können je nach Trübheit des Gewässers Wassertiefen von einigen Metern erreicht werden. Die gemessene Wassertiefe wird hierbei durch aus den reflektierten Signalen gewonnen Informationen korrigiert, was insbesondere in offenen Gewässern bei Wellenbewegungen eine Herausforderung darstellt /Westfeld et al. 2017/.

3 SYSTEMKOMPONENTEN

Die nachfolgenden Daten wurden mit einem selbstentwickelten Unterwasser-Laserscannersystem erstellt. Das System ist in *Abb. 2* dargestellt und basiert auf einem Kreuzlinienprojektor und einer Kamera. Aufgrund der hohen Lichtabsorption, insbesondere in trübem Wasser, und der Sonneneinstrahlung bei Arbeiten im Oberflächenwasser, wurden zwei grüne Hochleistungslaserlinienprojektoren ausgewählt. Die Laserlinien können somit mit genügend Helligkeit, um einen ausreichenden Kontrast zur Umgebungsbeleuchtung zu erzielen, in die Szene projiziert werden. Aus dem gleichen Grund ist es notwendig, Kameras mit einem möglichst großen Dynamikbereich einzusetzen. Für das Projektionsmuster wurde ein Kreuzlinienmuster gewählt, da dies das Scannen während der Bewegung in verschiedene Raumrichtungen ermöglicht und gleichzeitig Mehrfachmessungen erzielt.

3.1 Unterwasser-Laserscanner

Der verwendete Unterwasser-Laserscanner mit strukturierterm Licht, im linken Teil der *Abb. 2* zu sehen, besteht aus zwei Gehäusen mit ebenen Glasfenstern, von denen das eine die Kamera und das

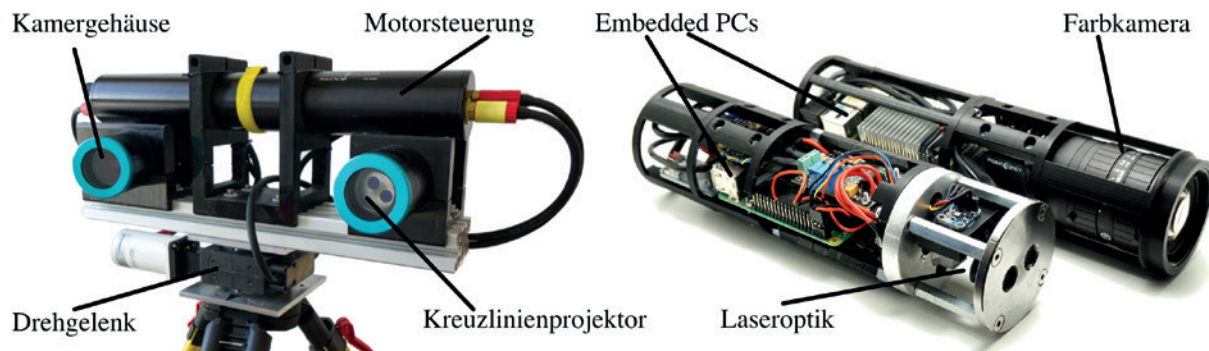


Abb. 2 | Entwickelter Unterwasserscanner. Links: Kreuzlinienscanner, montiert auf einem Drehgelenk. Rechts: Laserprojektorbaugruppe und Kamerasensorik.

andere den Kreuzlinienlaserprojektor enthält. Die beiden Gehäuse sind auf einem 50 cm langen Aluminiumprofil montiert. Halterungen für die Gehäuse wurden mittels 3D-Druck hergestellt, dabei ist das Kameragehäuse in einem Winkel von 20° in Richtung des Projektors gedreht. Darüber ist ein Gehäuse montiert, das die Motorsteuerelektronik und einen Netzschalter enthält, um den Unterwasserscanner über ein Unterwasserkabel mit der Oberfläche zu verbinden. Der Scanner befindet sich auf einem Robotergelenk mit einem 1:50-Schneckengetriebe, das von einem Schrittmotor angetrieben wird. Dies ermöglicht, den Scanner zu drehen, um 360° -Scans aufzunehmen. Dabei wird der Drehwinkel des Scanners durch einen integrierten Magnetencoder gemessen. Als Middleware für die Sensorschnittstellen, Protokollierung und Datenverarbeitung wird das Robot Operating System (ROS) verwendet, das auf den verbauten Embedded-PCs installiert ist und die über eine Netzwerkschnittstelle miteinander kommunizieren. Die Zeitsynchronisation der beiden Embedded-PCs wird über NTP durchgeführt. Die Synchronisation zwischen der Bildrate der Kamera und der Projektion der Laserlinien wird über ein zusätzliches Triggerimpulssignal gelöst.

Als Kamera kommt eine Farbkamera FLIR Blackfly mit einem Bildsensor Sony Pregius IMX249 mit 1920×1200 Pixeln und einer Bildrate von 41 Hz zum Einsatz. Aufgrund des Durchmessers der Unterwassergehäuse wurde ein Objektiv mit einer Brennweite von 12,5 mm gewählt, um ein maximal großes Sichtfenster zu erreichen. Der Kreuzlinien-Projektor besteht aus zwei Powell-Laserlinienoptiken und zwei Laserdioden. Bei den Lasern handelt es sich um zwei 1-W-Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 525 nm (grün), die an einem Aluminiumkühlkörper befestigt sind. Die Laseraus-

gangsleistung wird durch zwei Laserdiodentreiber gesteuert, die über PWM-Signale eingestellt werden können. Die PWM-Signale werden von einem an einen Embedded-PC angeschlossenen Mikrocontroller erzeugt.

Die beiden Laserprojektoren projizieren zwei senkrecht aufeinander stehende Linien, die somit ein Kreuz bilden. Der Fächerwinkel der Laserlinien beträgt 45° und wird im Wasser, bedingt durch die Brechung, auf ungefähr 32° reduziert. Die Laserlinien werden abwechselnd, je eine pro Kamerabild, in die Szene projiziert. Die Synchronisierung zwischen der Kamera und dem Laserdiodentreiber findet dabei über Triggerimpulssignale statt. Somit ist es möglich, die Laserlinien, mit ihrer jeweiligen Geometrie, eindeutig voneinander zu unterscheiden.

Für die Anwendung der mobilen Kartierung wurde ein zweites System, zu sehen in Abb. 3, mit einigen leichten Modifikationen aufgebaut. Die Farbkamera wurde durch eine monochrome Kamera mit einer Bildaufnahmefrequenz von 163 Hz und sonst gleichen Daten ersetzt. Des Weiteren wurde ein grüner Bandpassfilter, zu sehen im rechten Teil der Abb. 3, vor der Kamera installiert, um den Kontrast der grünen Laserlinie gegenüber dem Hintergrund zu erhöhen.

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

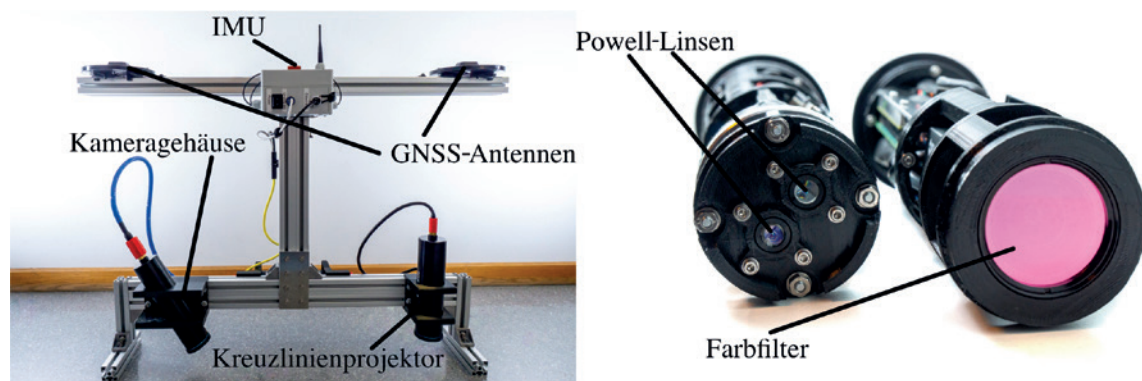


Abb. 3 | Links: Aufbau für mobile Kartierung (unten: Unterwasserscanner, starr verbunden mit Satellitennavigationskomponenten, oben: GNSS-Antennen und IMU für Trägheitsnavigation). Rechts: die Scannerkomponenten (links: Kreuzlinienprojektor, rechts: monochrome Kamera mit Farbfilter (grüner Bandpassfilter))

eingesetzt. Diese Empfänger stellen Rohdatenmessungen für GPS, GLONASS, Galileo und BeiDou mit 20 Hz zur Verfügung. Die Verwendung von zwei Empfängern ermöglicht es, aus diesen Daten direkt den Kurswinkel zu berechnen. Zusätzlich wurde eine Xsens-Mti-300-MEMS-IMU mit einer Messfrequenz von 100 Hz integriert.

Antenne, IMU und Unterwasserscanner wurden starr über Aluminiumprofile verbunden. Der mobile Aufbau ist im linken Teil der *Abb. 3* zu sehen. Für eine Verbesserung der Positionsdaten wird eine GNSS-Basisstation 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. Die Nachverarbeitung der Daten wird mittels RTKLIB durchgeführt, wodurch Positionslösungen mit der vollen Frequenz von 20 Hz berechnet werden können. Bei guten Empfangsbedingungen ist somit eine relative Positionsgenauigkeit im Zentimeterbereich möglich. Zur Bestimmung der vollen 6 Freiheitsgrade der Pose des Aufbaus wird eine lose gekoppelte Fusion zwischen der Orientierung aus der IMU und den GNSS-Positionen durchgeführt. Hierbei wird auch der Offset des Kurswinkels ausgeglichen, da sich die IMU gegen dem magnetischen Nordpol referenziert und nicht dem geographischen Nordpol. Für die Datenaufnahme wurde der Aufbau auf einem Floß befestigt, dieser Gesamtaufbau ist rechts in *Abb. 1* zu sehen.

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 Intensitätsschwellenwerten. Auf diese Weise muss der Linienextraktionsalgorithmus nur für Teile des Bilds berechnet werden, was die Verarbeitungszeit erheblich reduziert.

Der Unterwasser-Laserscanner wird durch Optimierung des Reprojektionsfehlers in Luft und Wasser kalibriert. Die Kamera wird zunächst nach der Methode von /Zhang 2000/ mit einer 3D-Kalibrierstruktur mit AprilTags /Wang & Olson 2016/ als Bildmarkierungen kalibriert. 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/. Da bei der Unterwasserkamera der Abstand vom Kamerazentrum zum Glasfenster ca. 2,8 cm beträgt und ein Acrylglasfenster mit 2 cm Dicke zum Einsatz kommt, ist es sinnvoll, die Brechungseffekte explizit auszugleichen, da sich sonst zum Randbereich des Kamerabilds größere Fehler ergeben. Zum Ausgleich wird ein Modell verwendet, das explizit die Doppelbrechung am Glasfenster berücksichtigt /Agrawal et al. 2012/. Die Parameter des Unterwassergehäuses wurden hierzu extern gemessen. Messfehler in der Lage und dem Abstand des Glasfensters werden durch radiale und tangentialer Verzerrungsparameter absorbiert. Hierzu werden diese Parameter durch Optimierung des Reprojektionsfehlers nach Ausgleich der Brechung auf Unterwasseraufnahmen bestimmt. 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 einzigen 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. Die Projektion der Laserebenen ist nahezu senkrecht zum Glasfenster des Laserprojektors mit Abweichungen von $< 1^\circ$. Im Nahbereich ist anhand der Kalibrierstruktur keine Deformation der Laserprojektion feststellbar. Erst ab einer Messdistanz von ca. 3 Meter geben sich größere Fehler im Bereich von 1 mm. Die Krümmung der Laserlinie durch die Brechungseffekte im Wasser wird deshalb über einen tangentialen Verzerrungsparameter korrigiert.

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 werden sowohl der Abstand des Kamerazentrums zur Rotationsachse als auch die

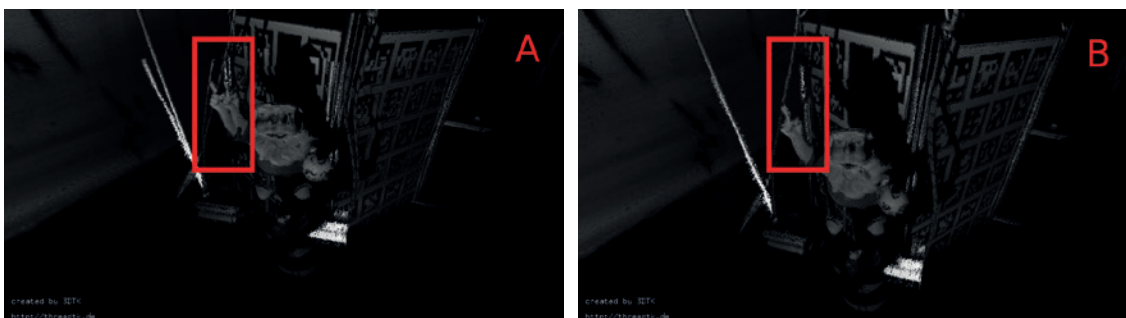


Abb. 4 | Ausschnitt aus einem Unterwasserscan von einer Testszene in ca. 2 m Entfernung. Links: Ergebnis mit initialen Parametern. Rechts: optimiertes Ergebnis.

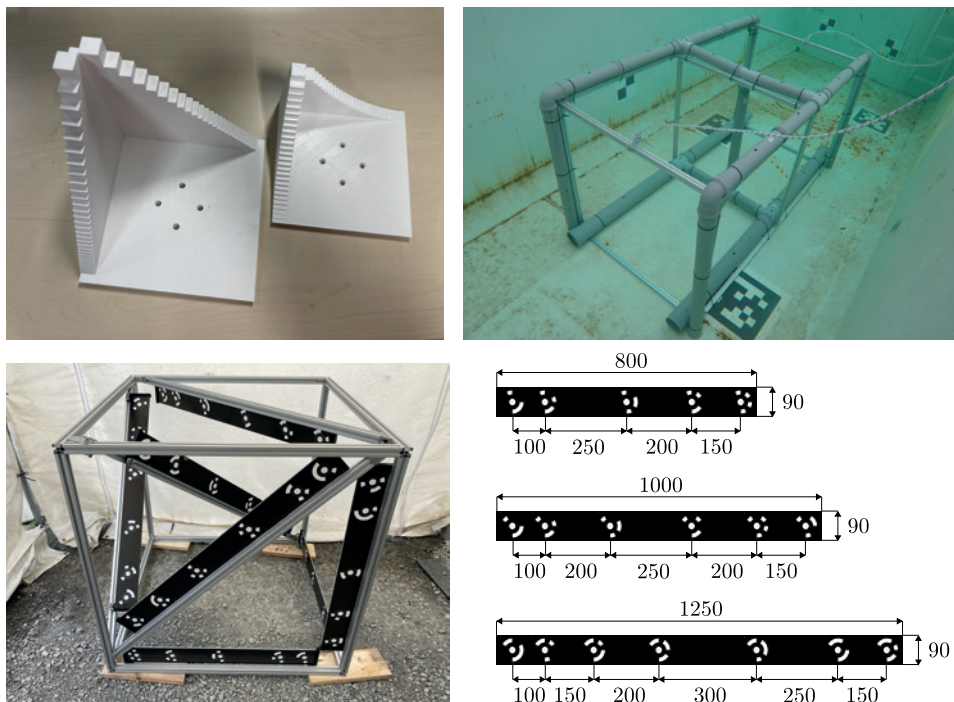


Abb. 5 | Die verwendeten Testobjekte. Oben links: eine Treppe mit einer Stufenhöhe und Breite von 0 – 15 mm zur Bestimmung der räumlichen Auflösung und eine Treppe mit konstanter Stufenbreite und einer Stufenhöhe von 0 – 5 mm zur Bestimmung der Tiefenauflösung. Oben rechts: ein Testobjekt aus genormten Abflussrohren mit den Abmaßen 2 m × 1 m × 1 m. Unten: 3D-Testfeld mit Kreismarken, aufgebaut aus bedruckten Glasplatten mit angegebenen Abmessungen in Millimetern.

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 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 *Abb. 4* 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-(ICP-)Algorithmus. Es werden die Drehachsenparameter gesucht, welche – anhand einer Nächste-Nachbar-Suche ermittelt – die Punkt-zu-Punkt-Distanz zwischen den beiden Scans der Einzellinien minimiert. Hierzu wird eine lokale Optimierung mithilfe der Methode von Powell verwendet. Im rechten Bild von *Abb. 4* ist das 3D-Scan-Ergebnis mit dem optimierten Parametersatz dargestellt.

Zur Kalibrierung der relativen Orientierung der Kamera zu den GNSS/IMU-Positionsbestimmungssystem wird eine Hand-Eye-Kalibrierung nach der Methode von /Li et al. 1995/ durchgeführt. Hierzu wird das Kalibriermuster in das Wasser gelegt. Die Kalibrierung

der Transformation zwischen Kamera und Positionsbestimmungssystem ergibt sich dann aus Optimierung anhand der Kameraposen relativ zum statischen Kalibriermuster und der bestimmten GNSS-IMU-Trajektorie.

5 ERGEBNISSE

Experimente wurden in einem 40 m³ großen Testtank, der aus einem Abrollcontainer aufgebaut ist /van der Lucht et al. 2019/, durchgeführt. Um die Auflösung des Scanners experimentell bestimmen zu können, wurden zwei stufenartige Testobjekte angefertigt, diese sind oben links in *Abb. 5* zu sehen. Bei dem linken Objekt handelt es sich um eine Art Treppe, mit Stufenhöhen und Stufenbreite von 0 – 15 mm. Im unteren Bereich von 0 – 5 mm Stufenweite steigt die Weite je Stufe um 0,2 mm, darüber um je 5 mm. Diese Konstruktion ermöglicht die Bestimmung des räumlichen Auflösungsvermögens. Das rechte Objekt in *Abb. 5* oben links ist ähnlich aufgebaut, jedoch bleibt die Stufenbreite konstant, während die Stufenhöhe von 0 mm bis 15 mm schrittweise um 0,2 mm erhöht wird. Dies ermöglicht eine möglichst präzise Bestimmung der Tiefenauflösung (entlang der Z-Achse) des Scanners. Ein weiteres Testobjekt der Größe 2 m × 1 m × 1 m ist am Boden des Tanks platziert. Das aus Plastikrohren und Aluminiumprofilen erstellte Objekt ist oben rechts in *Abb. 5* zu sehen. Als weiteres Testmuster dient ein 1 m × 1 m × 1 m großer Würfel mit im Raum verteilten Kreismarken mit definierten Abständen. Die Abstände sind in *Abb. 5* unten rechts in Millimetern angegeben.

Es werden sowohl Aufnahmen mit dem Scanner auf einem Stativ als auch Aufnahmen mit dem mobilen Aufbau mit Satellitennavigation durchgeführt. Für Versuche mit dem mobilen Scanner wurde dieser zunächst an einem Floß über der Rohrstruktur aus *Abb. 5* bewegt. Anschließend wurde ein weiterer Datensatz über der

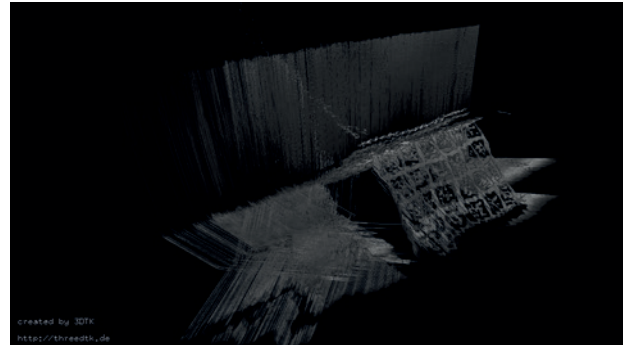
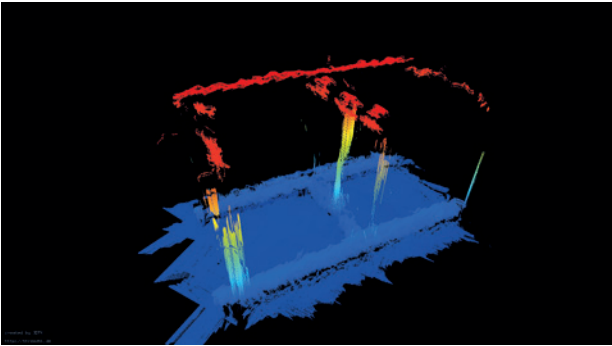


Abb. 6 | Links: Mobiler Scan der Teststruktur aus Rohren. Die lückenhafte Erfassung der oben liegenden Rohre ist auf den zu geringen Abstand zwischen Struktur und Scanner zurückzuführen, da der Testtank nur eine begrenzte Wassertiefe aufweist. Rechts: Mobiler Scan der AprilTag-Kalibrierecke. Der Hauptanteil der Fehler in beiden Scans liegt an einem schlechten GNSS Empfang und der daraus resultierenden schlechten Trajektorie, da der Deckel des Containers ein Teil des Himmels abschattet.

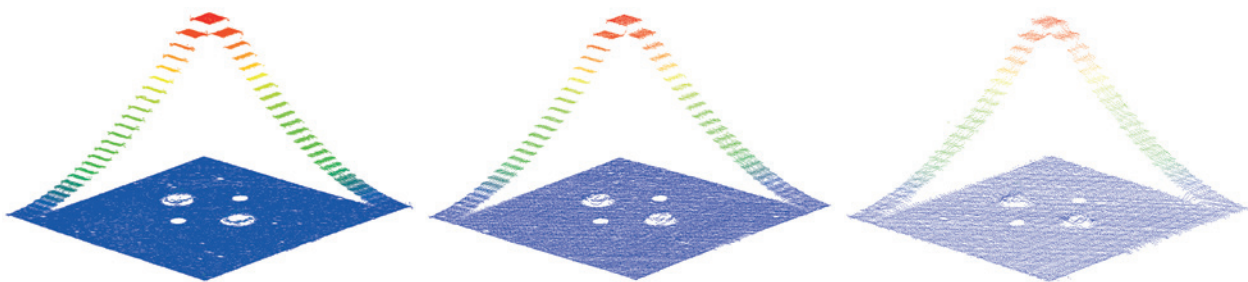


Abb. 7 | Punktwolken des Testobjekts zur Bestimmung der Z-Auflösung aus unterschiedlichen Entfernungen. Die Entfernungen betragen dabei, von links nach rechts, 0,85 m, 1,5 m und 2,3 m.

AprilTag-Kalibrierecke aufgezeichnet. Die Ergebnisse hiervon sind oben in *Abb. 6* zu sehen. Die linke Abbildung zeigt die verwendete Rohrstruktur. Die lückenhafte Erfassung der oben liegenden Rohre ist durch eine zu geringe Distanz zwischen dem Scanner und dem Objekt zu erklären, da der Testtank in seiner Tiefe auf 2,4 m begrenzt ist. Die unten liegenden Rohre sind deutlich als solche im Scan zu erkennen. Die rechte Abbildung zeigt die 90°-Ecke mit AprilTag-Mustern, auch diese ist klar zu erkennen. Der Fehler auf beiden Objekten lässt sich hauptsächlich auf einen schlechten GNSS-Empfang im Testtank zurückführen, da der geöffnete Metalldeckel des Containers einen großen Teil des Himmels abschattet.

Nach diesem groben Einblick in die Qualität der aufgezeichneten Daten wird im Folgenden eine exaktere Auswertung der Auflösung mithilfe der beiden Auflösungstestmuster in *Abb. 5* oben links

durchgeführt. Hierzu wird der Scanner auf einem Stativ im Testtank platziert und die beiden Objekte der Reihe nach in steigendem Abstand erfasst. Die Messdistanz bewegte sich hierbei im Bereich von 0,5 m bis 4 m. *Abb. 7* zeigt die resultierenden Scans für die Bestimmung der Z-Auflösung für die Distanzen 0,85 m, 1,5 m und 2,3 m. Für die Auswertung wurde zunächst, nach /Siciliano 2016, S. 786/, die theoretische Auflösung des Scanners pro Pixel und pro $\frac{1}{4}$ Pixel mit

$$|dZ| = Z^2 \frac{dx}{fb} \quad (1)$$

berechnet. Dabei ist eine Pixelgröße von $5,86 \mu\text{m}$, eine Brennweite von $f = 17 \text{ mm}$ (äquivalente Brennweite in Wasser) und eine Baseline $b = 30 \text{ cm}$ einzusetzen. *Abb. 8* zeigt die experimentell bestimmte Auflösung des Scanners, dabei ist links das gesamt

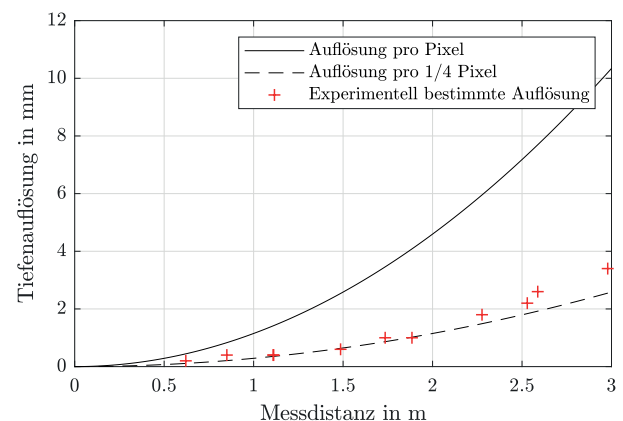
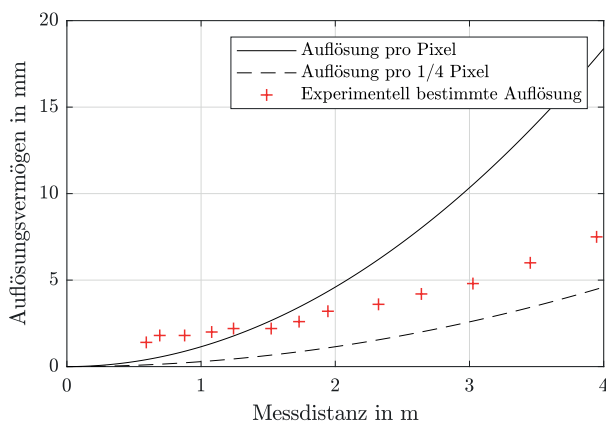


Abb. 8 | Links: Ergebnisse des Auflösungstests des Scanners. Rechts: Ergebnisse der Bestimmung der Auflösung des Scanners in Z-Richtung des Systems.

Auflösungsverhalten und rechts speziell die Tiefenaufklärung zu sehen. Dabei beginnt die Auswertung bei ca. 0,5 m, da die Geometrie des Scanners Messungen im Bereich $< 0,5$ m nicht zulässt. In beiden Graphen ist je die berechnete theoretische Auflösung pro Pixel und pro $\frac{1}{4}$ Pixel eingezeichnet. Die bestimmte Tiefenaufklärung liegt hierbei nahezu auf der Linie der theoretischen Auflösung für $\frac{1}{4}$ Pixel, wobei die Abweichung ab 2,5 m Distanz leicht zunimmt. Die räumliche Auflösung des Scanners liegt etwas höher, etwa bei $\frac{1}{2}$ Pixel, als die Tiefenaufklärung. Außerdem ist zu beobachten, dass sich die Genauigkeit im Nahbereich unter 1,5 m nur noch wenig verbessert und ab 1 m nahezu konstant ist. Dieses Phänomen lässt sich durch den begrenzten Schärfentiefebereich der Kamera erklären. Die Kamera wurde auf eine Distanz von 2 m fokussiert. Die

Laserlinie ist auf Aufnahmen unterhalb von 1,5 m zum einen nicht mehr scharf zu erkennen und wird zum anderen deutlich breiter.

Für einen weiteren Vergleichstest wurde ein Referenzobjekt, ein Zwerg, auf ca. 1 m Entfernung eingescannt. In *Abb. 9* ist links ein hochpräziser Scan des Testobjekts zu sehen, dies wurde mithilfe eines FaroArm Quantum S und einer FaroBlu Laser Line Probe angefertigt. Das mittlere Bild in *Abb. 9* zeigt den Scan des Unterwasser-Laserscanners und das rechte Bild stellt, farblich von Blau nach Rot eingefärbt, die Abweichungen zwischen den beiden Punktwolken an. Dabei ist zu erkennen, dass der Fehler im Mittel bei 1,1 mm liegt. Fehler größer als 2,5 mm ergeben sich durch Ausreißer, z. B. an der Kante des Fußballs.

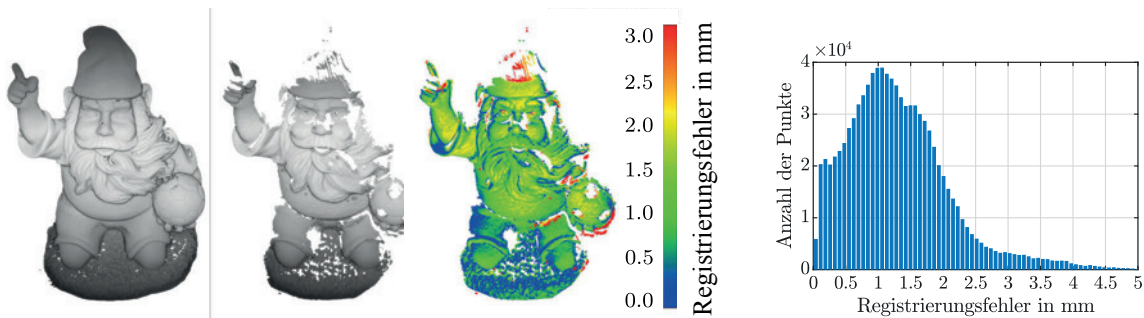


Abb. 9 | Links: Referenzscan eines Testobjekts, aufgezeichnet mit einem FaroArm Quantum S und einer FaroBlu Laser Line Probe. Mitte: Scan des Testobjekts mit dem Unterwasser-Laserscanner, eingefärbt nach Höhe. Rechts: Vergleich der beiden Scans, eingefärbt nach Abweichung von Blau nach Rot und Histogramm der Abweichungen.



Abb. 10 | Ein $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ großer Würfel mit auf Glasplatten gedruckten Markern als Referenzpunkte. Rechts ein Scan des Würfels aus 3,2 m Entfernung, eingefärbt nach Intensität der Punktwolke.

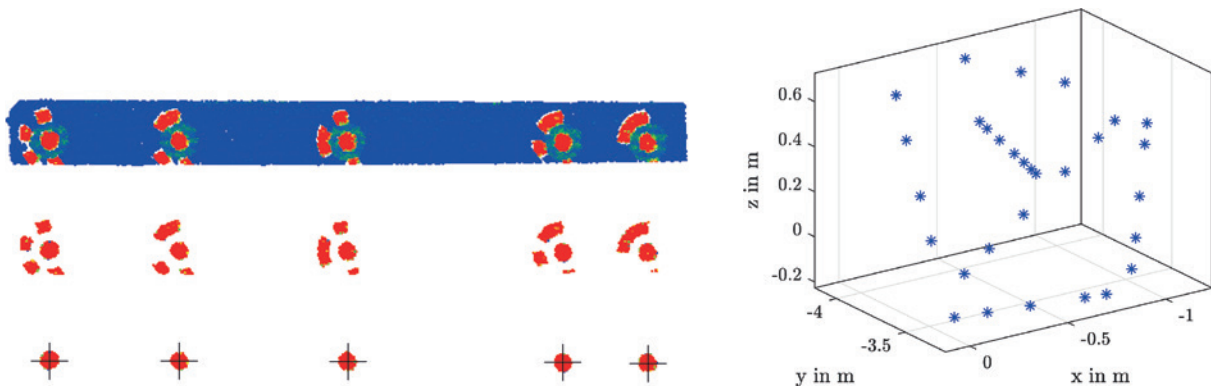


Abb. 11 | Links: Extraktionsschritte der Marker aus dem Scan des Würfels aus *Abb. 10*. Dabei wurden zunächst die Marker nach Intensitätsschwellenwerten extrahiert und anschließend das Zentrum für jeden Marker bestimmt. Rechts: die Lage aller extrahierten Punkte des Würfels im Raum.

RIEGL LASER SCANNER für UAV-ANWENDUNGEN



Zuletzt wurde eine Aufnahme eines $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ großen Würfels angefertigt, an dem an unterschiedlichen Kanten Glasplatten mit Markern, deren Abstände bekannt sind, montiert sind. Der Aufbau des Würfels ist links und der Scan, eingefärbt nach Intensität, rechts in *Abb. 10* zu sehen. Die Entfernung zwischen der Vorderseite des Würfels und dem Scanner betrug dabei 3,4 m. Aus dem entstandenen Scan wurden anhand der Intensitätsschwellenwerte die Marker extrahiert und deren Mittelpunkte bestimmt. Diese Schritte sind beispielhaft in *Abb. 11* links dargestellt. Die rechte Grafik in *Abb. 11* zeigt alle extrahierten Punkte für die Auswertung. Dabei ergibt sich für die beiden Frontplatten ein RMS als Längenabweichung von 1,7 mm, über alle Punkte des Würfels ergibt sich ein RMS von 3,4 mm. Die größten Abweichungen ergeben sich dabei für die größten Abstände auf den Raumdiagonalen. Der maximale Fehler aller Längenmessungen beträgt hierbei 11 mm.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Beitrag wurde ein Unterwasser-Laserscannersystem und dessen Anwendung für mobile Kartierung in Kombination mit Satellitennavigation beschrieben. Im Anschluss wurde in verschiedenen Experimenten die Genauigkeit und die Auflösung des Systems bestimmt. Dabei hängt die erreichte Genauigkeit der Messungen stark von der Kalibrierung, insbesondere der Kalibrierung der Kamera, ab. Hierbei wurde gezeigt, wie bessere Parameter durch Optimierung des Punktwolkenergebnisses gefunden werden können. Die Auflösungstests ergaben eine Tiefenauflösung nahe der errechneten Auflösungskurve für $\frac{1}{4}$ Pixel und eine leicht schlechtere räumliche Auflösung. Das Scannen mit einem statisch platzierten Scanner ergibt zuverlässig Punktwolken in guter Qualität. 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 Bundestags.

LITERATUR

2G Robotics (2020): ULS-500 underwater laser scanner. <http://www.2grobotics.com/products/underwater-laser-scanner-uls-500>. (04. 12. 2020).

3D at Depth (2020): SL1 subsea lidar. <https://www.3datdepth.com/product/sl1-lidar-laser> (04. 12. 2020).

Agrawal, A.; Ramalingam, S.; Taguchi, Y.; Chari, V. (2012): A theory of multi-layer flat refractive geometry. In: 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, Piscataway, NJ, 3346–3353.

RIEGL „WAVEFORM-LIDAR TECHNOLOGY“

für professionelle Vermessungseinsätze mittels UAV

Hier finden Sie den Scanner für Ihr ganz spezielles Vermessungsprojekt!



VUX-240

vielseitiger Scanner für den Einsatz auf großen UAVs, Helikoptern oder kleinen bemannten Fluggeräten

- bis zu 2150 m Reichweite @ $\rho \geq 80\%$
- 1,5 MHz eff. Pulsrate
- 75° Sichtfeld
- 4,1 kg



VUX-120

UAV LiDAR Sensor mit innovativem „NFB-Scanning“ (nadir/vorwärts/rückwärts) für eine optimale Zielerfassung

- bis zu 1430 m Reichweite @ $\rho \geq 80\%$
- 1,5 MHz eff. Pulsrate
- 100° Sichtfeld
- 2 kg

VUX-1UAV / VUX-1LR

leistungsstarke Sensoren für eine Vielzahl von Anwendungen in der Multikopter-basierten UAV-Vermessung

- bis zu 1050 m / 1540 m Reichweite @ $\rho \geq 80\%$
- 500 kHz / 750 kHz eff. Pulsrate
- 330° Sichtfeld
- 3,5 kg

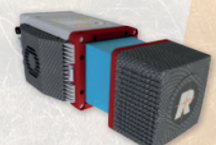


miniVUX Series

extrem leichte LiDAR Sensoren für die Anwendung mit kleinen UAVs

miniVUX-1UAV / -2UAV / -3UAV

- bis zu 330 m Reichweite @ $\rho \geq 80\%$
- 100 kHz / 200 kHz eff. Pulsrate
- 360° Sichtfeld
- 1,55 kg



- Becker, J. J.; Sandwell, D. T.; Smith, W. H. F.; Braud, J.; Binder, B. et al. (2009): Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30_PLUS. In: *Marine Geodesy* 32(2009)4, 355–371.
- Bleier, M.; Nüchter, A. (2017): Low-cost 3D Laser Scanning in Air or Water Using Self-calibrating Structured Light. In: *Proceedings of the 7th ISPRS International Workshop 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (3D-ARCH)*, 105–112.
- Bräuer-Burchardt, C.; Heinze, M.; Schmidt, I.; Kühmstedt, P.; Notni, G. (2016): Underwater 3D surface measurement using fringe projection based scanning devices. In: *Sensors* 16(2016)1, 13.
- Bruno, F.; Bianco, G.; Muzzupappa, M.; Barone, S.; Razionale, A. V. (2011): Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66(2011)4, 508–518.
- Castillón, M.; Palomer, A.; Forest, J.; Ridaó, P. (2019): State of the Art of Underwater Active Optical 3D Scanners. In: *Sensors* 19(2019)23, 5161.
- Chi, S.; Xie, Z.; Chen, W. (2016): A laser line auto-scanning system for underwater 3D reconstruction. In: *Sensors* 16(2016)9, 1534.
- Doneus, M.; Miholjek, I.; Mandlbürger, G.; Doneus, N.; Verhoeven, G.; Briese, C.; Pregesbauer, M. (2015): Airborne laser bathymetry for documentation of submerged archaeological sites in shallow water. In: *ISPRS/CIPA Workshop Underwater 3D Recording and Modeling, Piano di Sorrento, Italy, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W5*, 99–107.
- 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 XL-5/W5*, 117–122.
- GEBCO (2020): The general bathymetric chart of the oceans. <https://www.gebco.net> (04.12.2020).
- Jacobi, M.; Karimanzira, D. (2014): Multi sensor underwater pipeline tracking with AUVs. In: *Proceedings of 2014 OCEANS – St. John's*.
- Jordt-Sedlazeck, A.; Koch, R. (2013): Refractive structure-from-motion on underwater images. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. IEEE, Piscataway, NJ*, 57–64.
- Kahmen, O.; Rofalski, R.; Conen, N.; Luhmann, T. (2019): On Scale Definition Within Calibration of Multi-camera Systems in Multimedia Photogrammetry. In: *Proceedings of the 2nd ISPRS International Workshop Underwater 3D Recording and Modelling, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences XLII-2/W10*, 93–100.
- Kalwa, J.; Tietjen, D.; Carreiro-Silva, M.; Fontes, J.; Brignone, L. et al. (2016): The European Project MORPH: Distributed UUV systems for multimodal, 3D underwater surveys. In: *Marine Technology Society Journal* 50(2016)4, 26–41.
- Kraken Robotics (2020): The Kraken Robotics SeaVision subsea 3D laser imaging system. <https://krakenrobotics.com/products/seavision> (04.12.2020).
- Li, A.; Wang, L.; Wu, D. (1995): Simultaneous robot-world and hand-eye calibration using dual-quaternions and kronecker product. In: *International Journal of the Physical Sciences* 5(1995)10, 1530–1536.
- van der Lucht, J.; Bleier, M.; Nüchter, A. (2019): A Low Cost Underwater Test Environment. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W17*, 399–404. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-399-2019>.
- Martins, A.; Almeida, J.; Almeida, C.; Dias, A.; Dias, N. et al. (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, Piscataway, NJ, 1494–1500.
- Menna, F.; Agrafiotis, P.; Georgopoulos, A. (2018): State of the art and applications in archaeological underwater 3D recording and mapping. In: *Journal of Cultural Heritage* 33(2018), 231–248.
- Palomer, A.; Ridaó, P.; Youakim, D.; Ribas, D.; Forest, J.; Petillot, Y. (2018): 3D laser scanner for underwater manipulation. In: *Sensors* 18(2018)4, 1086.
- Siciliano, B.; Khatib, O. (2016): *Springer handbook of robotics*. Springer, Berlin/Heidelberg.
- Steger, C. (1998): An unbiased detector of curvilinear structures. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 20(1998)2, 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. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 67(2015)11-12, 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. In: *Measurement Science and Technology* 10(1999)12, 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, Piscataway, NJ, 4193–4198.
- Westfeld, P.; Maas, H. G.; Richter, K.; Weiß, R. (2017): Analysis and correction of ocean wave pattern induced systematic coordinate errors in airborne LiDAR bathymetry. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 128(2017), 314–325.
- Zhang, Z. (2000): A flexible new technique for camera calibration. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22(2000)11, 1330–1334.

Dipl.-Ing. Michael Bleier

JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT WÜRZBURG
INFORMATIK VII – ROBOTIK UND TELEMATIK

Am Hubland | 97074 Würzburg
michael.bleier@uni-wuerzburg.de



M.Sc. Joschka van der Lucht

JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT WÜRZBURG
INFORMATIK VII – ROBOTIK UND TELEMATIK

Am Hubland | 97074 Würzburg
joschka.lucht@uni-wuerzburg.de



Prof. Dr. Andreas Nüchter

JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT WÜRZBURG
INFORMATIK VII – ROBOTIK UND TELEMATIK

Am Hubland | 97074 Würzburg
andreas@nuechti.de



Manuskript eingereicht: 04.12.2020 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet

