

Untersuchungen von optischen Scansystemen zur geometrischen Erfassung von Unterwasserstrukturen

Ein Beitrag von FRANK NIEMEYER, TIM DOLEREIT, MATTHIAS NEUMANN, JAN ALBIEZ, MATTHIAS VAHL und MICHAEL GEIST

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit optischen Erfassungs- und Scansystemen für den Bereich unter Wasser. Dabei wurde eine Einteilung in photogrammetrische, trigonometrische und impulsbasierte Systeme vorgenommen. Es wurden Messungen mit verschiedenen Systemen im Schleppkanal des Lehrstuhls für Strömungstechnik der Universität Rostock durchgeführt. Stellvertretend für photogrammetrische Erfassungssysteme kam das Stereokamerasystem vom Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung zum Einsatz. Das ULS-200-Scansystem von 2GRobotics und das SeaVision-Lasersystem von Kraken Robotik standen stellvertretend für trigonometrische Scansysteme zur Verfügung. Ein impulsbasiertes Scansystem stand für die Untersuchungen nicht bereit. Zusätzlich wurde das SeaVision-Scansystem in der Ostsee nahe des künstlichen Riffs bei Nienhagen unter realistischen Bedingungen getestet. Die Messungen spiegeln das derzeitige Potenzial optischer Messsysteme für den Bereich unter Wasser wider. Vor- und Nachteile der Systeme werden diskutiert.

Autoren

Dr. Frank Niemeyer und Dr. Michael Geist sind wissenschaftliche Mitarbeiter an der Fraunhofer-Einrichtung für Großstrukturen in der Produktionstechnik (IGP) in Rostock.

Dr. Tim Dolereit und Matthias Vahl sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung (IGD) in Rostock.

Matthias Neumann ist Geschäftsführer der IMAWIS Maritime Wirtschafts- und Schiffbauforschung GmbH in Rostock.

Dr. Jan Albiez ist Director of Engineering, Kraken Robotik GmbH in Bremen.

frank.niemeyer@
igp.fraunhofer.de

Subsea | Laserscanner | Stereokamerasystem | ULS-200 | SeaVision | Schleppkanal | Ostsee

Einleitung

Der Bereich unter Wasser wird für die Wirtschaft immer interessanter. Nicht nur die Gas- und Ölindustrie, die schon seit Jahren in Tiefseegebenden Untersuchungen, Bohrungen und Förderungen vornimmt, sondern auch der Tiefseebergbau und der Bereich der erneuerbaren Energien weiten ihre Aktivitäten im Bereich unter Wasser aus. Dabei werden immer größere Tiefen exploriert, die für den Menschen ohne spezielle Hilfssysteme nicht mehr erreichbar sind. Diese Hilfssysteme müssen dabei an die Umgebungsbedingungen, wie z. B. an den hohen Wasserdruck, die Dunkelheit, den Salzgehalt und die Temperatur, angepasst sein. Mit dem Ausbau und der Zunahme der Unterwassertechnik steigt auch die Anzahl der Inspektionsaufgaben. Dabei wird die Strategie der Predictive Maintenance (vorausschauende Wartung) verfolgt, die im Umfeld von Industrie 4.0 Maschinen und Anlagen proaktiv wartet, um z. B. Havarien oder Ausfallzeiten vorzubeugen. Optische Scansysteme für den Bereich unter Wasser können hier einen wesentlichen Beitrag leisten.

Optische Scansysteme sind in der Lage, ihre Umgebung dreidimensional zu erfassen und in Form von 3D-Punktwolken abzubilden. So können Oberflächen von Unterwasserstrukturen erfasst und z. B. auf Deformationen untersucht werden. Die Einsatzgebiete sind zahlreich, sie reichen von Bestimmungen von Dellen, Beulen und Bewuchs, über Munitions- und Wracksuche, Navigationshilfe und Hinderniserkennung bis hin zu Inspektion von großen flächenhaften Strukturen unter Wasser. Bisher wurden für diese Aufgaben oft Sonargeräte eingesetzt, die zwar sehr weit

messen können, deren Messgenauigkeit und Auflösung jedoch meist im Zentimeter- bis Dezimeterbereich liegen. In den letzten Jahren war zu beobachten, dass Scanner vermehrt für den Gebrauch unter Wasser entwickelt wurden, um z. B. Schweißnähte an Unterwasserstrukturen zu inspizieren (Ekkel et al. 2014), ganze Infrastrukturen unter Wasser z. B. für die Gas- und Ölindustrie in großen Wassertiefen zu kartieren (3D at Depth 2018) oder Rohrleitungen zu überprüfen (2GRobotics 2018). Im Gegensatz zu akustischen Systemen bieten optische Scansysteme eine höhere Punktauflösung und Messgenauigkeit. Sie sind jedoch meist nur innerhalb des Sichtbarkeitsbereichs unter Wasser einsetzbar. Akustische Systeme hingegen können über mehrere 100 m eingesetzt werden.

Dieses Paper gibt einen Überblick über die Möglichkeiten und Grenzen von optischen Unterwasserscansystemen. Auf Grundlage erfasster Unterwassermessungen ist es möglich, Fragestellungen hinsichtlich wichtiger Qualitätskriterien, wie z. B. Einflussfaktoren auf die Messunsicherheit und Streupunktanteil, zu beantworten. Die Untersuchungen wurden durch die Fraunhofer-Einrichtung für Großstrukturen in der Produktionstechnik (IGP) mit Hilfe von selbst entwickelten Prüfbjekten vorgenommen. Für die einzelnen Untersuchungen standen das Scansystem ULS-200 von 2G-Robotics als Leihgabe des Instituts für Ostseeforschung in Warnemünde (IOW), das SeaVision-Lasersystem von Kraken Robotik aus Bremen und das photogrammetrische Aufnahmesystem vom Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung (IGD) aus Rostock zur Verfügung.

Prüfobjekt

Um vergleichbare Messungen durchzuführen, wurde ein Prüfobjekt mit offshoreähnlichen Strukturen verwendet (Abb. 1). An der einen Seite des Prüfobjekts befindet sich eine zylindrische Struktur; an ihr lassen sich z. B. verschiedene Auftreffwinkel des Laserstrahls von Scansystemen untersuchen. Zudem sind Löcher mit verschiedenen Durchmessern (1 mm bis 100 mm) vorhanden, um Aussagen zum Auflösungsverhalten, z. B. zur erkennbaren Größe von Rissen oder Öffnungen, abschätzen zu können. In der Mitte ist eine konvexe Kante im Winkel von 90° installiert, an der sich Kantenefekte analysieren lassen. Auf der anderen Seite befindet sich eine Ebene vor einer anderen Ebene, mit der sich Kantenübergangseffekte untersuchen lassen. Zur Bestimmung von Maßstäben wurden auf den Prüfkörper wasserfeste Schachbrettmarken (5 cm \times 5 cm) geklebt. Das Prüfobjekt hat die Abmessungen von 100 cm \times 60 cm, besteht aus Industriestahl und ist sehr stabil gegenüber äußeren Einflüssen (z. B. Stößen). Die Aufbauten haben Höhen zwischen 10 cm und 16 cm. Beschichtet ist das Prüfobjekt mit grauem Industrielack, der bei einigen Offshore-Strukturen verwendet wird. Zudem sind Vorrichtungen für Schäkel angebracht, um das System mit Hilfe von Seilen ins Wasser abzulassen.

Der Prüfkörper wurde im Verbund mit der IMA-WIS GmbH gefertigt und am Fraunhofer IGP mit Messsystemen höherer Genauigkeit vermessen, um flächenhafte Vergleichsmodelle (Soll-Modelle) zu erstellen und um die aufgeklebten Marken zu referenzieren. Zum Einsatz kamen dabei das Streifenlichtprojektionssystem GOM ATOS III und ein Leica Lasertracker. Abb. 2 stellt das erfasste Modell dem geplanten CAD-Modell gegenüber. Die Öffnungen auf dem Zylinderteil wurden neu arrangiert. Die farblich dargestellten Abweichungen liegen innerhalb der Fertigungstoleranz. Für die weiteren Vergleiche wird das gemessene Modell zur Referenz.

Optische Scansysteme für den Bereich unter Wasser

Optische Scansysteme für den Bereich unter Wasser können in photogrammetrische, trigonometrische und impulsbasierte Erfassungssysteme unterschieden werden (Hildebrandt et al. 2008). Bei photogrammetrischen Systemen werden zwei Kameras als Stereokamerasystem verwendet, die auf ein Messobjekt ausgerichtet sind. Mit Hilfe des stereoskopischen Effekts lassen sich über korrespondierende Bildpunkte in den Bildern der beiden Kameras und über die Orientierung der Kameras zueinander 3D-Punkte berechnen. Dazu müssen die inneren und äußeren Orientierungsparameter der Kameras durch Kalibrierung bestimmt werden. Korrespondierende Bildpunkte lassen sich dabei automatisch über codierte Marken oder durch einen direkten Vergleich der Bildpaare mit Hilfe bewährter Verfahren aus der Computer Vision bestimmen. Dieses sogenannte Stereo-Matching

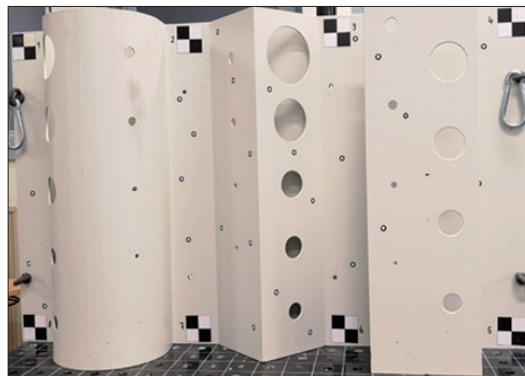


Abb. 1: Prüfobjekt mit offshoreähnlichen Strukturen

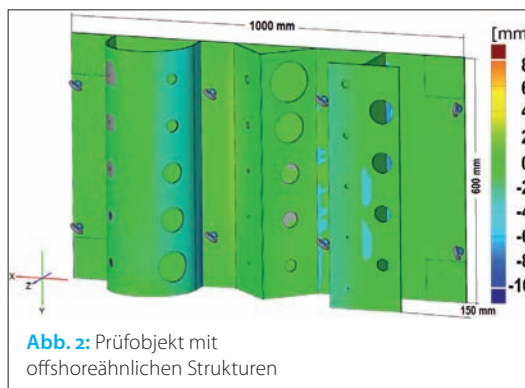


Abb. 2: Prüfobjekt mit offshoreähnlichen Strukturen

kann durch einen Vergleich anhand der geometrischen Ausrichtung eines Bildpaares oder anhand automatisch erkannter markanter Merkmale in beiden Bildern durchgeführt werden. Falls in den Bildern keine Punkte identifiziert werden können, z. B. weil die Flächen farblich zu homogen sind, bilden diese unberechneten Bereiche Löcher in der 3D-Punktwolke ab. Um diesem Effekt zu begegnen, kommen bei einigen photogrammetrischen Systemen Projektionseinheiten zum Einsatz, die auf den farblich homogenen Flächen erkennbare Muster projizieren (Bräuer-Burchardt et al. 2015). Der Sichtbereich unter Wasser grenzt den Aktionsradius solcher Systeme ein. Durch die zumeist geringe Basislänge zwischen den Kameras werden diese Erfassungssysteme in der Regel im Nahbereich eingesetzt, um, unter Berücksichtigung des Basis/Höhen-Verhältnisses, eine ausreichende Genauigkeit am Objekt erreichen zu können. Der Einsatz von Kameras im Unterwasserbereich ist mittlerweile eine verbreitete Praxis. Die eingesetzte Hardware kann dabei sowohl aus dem Consumer-Bereich stammen, wie beispielsweise aus der GoPro-Serie (Iscar et al. 2017), als auch aus der professionellen Filmtechnik (Rinaldi und Hordosch 2015). Die am häufigsten anzutreffende Variante sind jedoch Industriekameras in Kombination mit speziell gefertigten Unterwassergehäusen. Ein Beispiel sind die Stereokameras aus der Bumblebee-Serie (Łuczyński et al. 2017), die tauchergeführt (Bulow et al. 2013) oder am AUV (Autonomous Underwater Vehicle) verbaut (Pfungsthorn et al. 2016) eingesetzt werden können. Neben den tauchergeführten Systemen (Henderson et al. 2013) und

den AUVs (Johnson-Roberson et al. 2017) kommen als Trägerplattform für Stereokameras auch ROVs (Remotely Operated Vehicles) (Rossi et al. 2018) oder ASVs (Autonomous Surface Vessels) (Isicar und Johnson-Roberson 2015) infrage. Weiterhin ist es auch möglich, »Embedded Komponenten« für die direkte Verarbeitung der Bilddaten einzusetzen (Nawaf et al. 2018). Stellvertretend für photogrammetrische Messsysteme unter Wasser wurde das Stereokamerasystem mit externer Beleuchtung vom Fraunhofer IGD verwendet.

Trigonometrische Scansysteme arbeiten hingegen mit Kamera und Linienlaser. Kamera und Linienlasermodul werden über eine Halterung mit definiertem Abstand (Basislinie) so konstruiert, dass beide Einheiten auf das Messobjekt ausgerichtet sind. Die Kamera nimmt Bilder der projizierten Laserlinien auf dem Messobjekt auf und berechnet über die trigonometrischen Verhältnisse zwischen Kamera und Lasermodul 3D-Punkte entlang dieser Laserlinie. Wird der Laserstrahl über das Objekt bewegt, können die einzelnen Linienscans zu einem Flächenscan kombiniert werden. Trigonometrische Scansysteme sind seit Langem in der Qualitätskontrolle in der Industrie zu finden, z. B. im Automobilbau als Handprüfgeräte (z. B. Leica Absolute Scanner LAS) oder bei der Prüfung von langen Bauteilprofilen (Schlüter 2002).

Durch das relativ simple Messprinzip wird diese Art von Scanner auch unter Wasser verwendet. Lucht et al. (2018) entwickelten beispielsweise einen Low-Cost-3D-Laserscanner, der sich sowohl über als auch unter Wasser selbst kalibriert. Dieses System soll zudem durch die Wasseroberfläche hindurch messen. Durch den Einsatz der Kamera funktionieren trigonometrische Messsysteme un-

ter Wasser nur innerhalb des Sichtbereichs. Über die Variation der Entfernung (Basislinie) zwischen Kamera und Lasermodul können auch größere Messbereiche von mehreren Metern erfasst werden. Stellvertretend für trigonometrische Scansysteme wurden zum einen das Scansystem ULS-200 von 2G Robotics, das für maximale Entfernungen bis zu 2,5 m ausgelegt ist, und das Lasersystem SeaVision von Kraken Robotik mit einem maximalen Messbereich von bis zu 8 m verwendet.

Impulsbasierte Scansysteme bestimmen über die Laufzeit eines Laserstrahlimpulses die Entfernung zum Messobjekt. Wird der Laserimpuls im Raum über zwei definierte und zueinander orthogonal liegende Drehrichtungen abgelenkt, kann von der Umgebung eine 3D-Punktwolke erstellt werden. Durch Verstärkung des Laserstrahlimpulses ist eine Messung über den Sichtbereich hinaus möglich. Eine der ersten Lösungen der Unterwasser-Scantechnik stellt das System INScan der Firma Teledyne CDL dar. Bei diesem System wird das Pulslaufzeitverfahren in Kombination mit einem Scanner angewandt, womit Objekte unter Wasser geometrisch erfasst und rekonstruiert werden (Manning 2014). Die Firma »3D at Depth« bietet einen impulsbasierten Laserscanner für den Bereich unter Wasser an (Hardy 2018). Parallel wird am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik (IPM) in Freiburg ein impulsbasiertes Laserscansystem für den Bereich unter Wasser entwickelt (Stemmler et al. 2019).

ULS-200

Der ULS-200 (Underwater Laser Scanner) reiht sich in die Produktfamilie von 2G Robotics ein, zu der auch der ULS-100 und der ULS-500 gehören. Während der ULS-100 zwischen 0,13 m und 1 m und der ULS-500 bis zu 15 m weit messen können, wurde das ULS-200-Scansystem für Bereiche zwischen 0,36 m und 2,5 m entwickelt.

Das ULS-200-Scansystem (Abb. 3) gehört zu den trigonometrischen Scannern und arbeitet mit blauem Laserlicht (440 nm, siehe Abb. 4). Die Laserlinie deckt einen Bereich von 68° an der Luft und 50° im Wasser ab. Es werden 480 Punkte pro Linie bestimmt. Durch die starre Verbindung zwischen Lasermodul und Kamera, die sich zusammen um eine Achse drehen, können 360°-Rundumscans durchgeführt werden. Dabei können bis zu 4750 Punkte pro Sekunde bzw. knapp 10 Profile pro Sekunde erfasst werden. Die Rotation des Systems kann in Schritten von bis zu 0,018° erfolgen, was die Messzeit zwar erhöht, jedoch die Scanauflösung der einzelnen Scanprofile zueinander verbessert. Das Scansystem wiegt an der Luft 3,9 kg, im Wasser 1,6 kg. Die Punktwolken werden als XYZ-Dateien im ASCII-Format übergeben (2G Robotics o. J.).

SeaVision

Das 3D-Lasersystem SeaVision von Kraken Robotik ist ein trigonometrisch arbeitendes Scansystem für

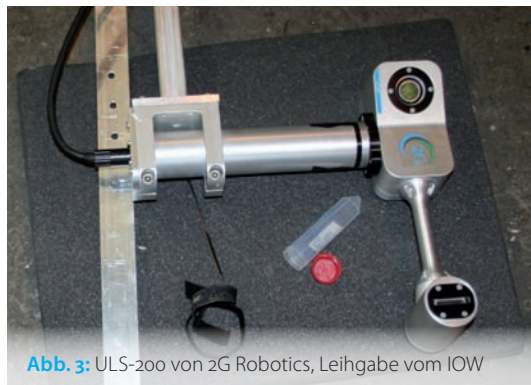


Abb. 3: ULS-200 von 2G Robotics, Leihgabe vom IOW

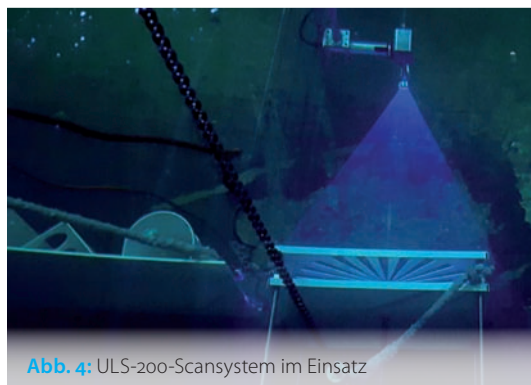


Abb. 4: ULS-200-Scansystem im Einsatz

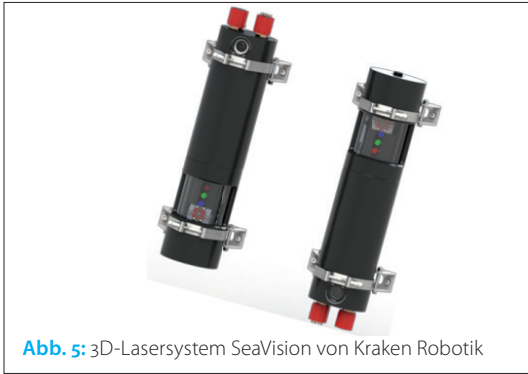


Abb. 5: 3D-Lasersystem SeaVision von Kraken Robotik

Bild aus: Kraken Robotik, 2018



Abb. 6: SeaVision 3D-Lasersystem während der Messung mit drei verschiedenen Wellenlängen

Bild aus: Niemeyer et al., 2019

den Bereich unter Wasser. Es besteht aus einem Paar zylindrischer Druckkörper, in denen jeweils ein Linienlaser und eine Kamera verbaut sind (Abb. 5). Die Lasereinheit wird innerhalb des Druckkörpers geschwenkt und das Licht gelangt über ein zylindrisches Fenster nach außen, sodass sich keine bewegten Teile im Wasser befinden. Die Kamera des einen Druckkörpers korrespondiert dabei jeweils mit dem beweglichen Laser im anderen Druckkörper. Über den Abstand (Basislinie) der beiden Einheiten zueinander lässt sich die Entfernung des Messbereichs festlegen. Im Gegensatz zu anderen trigonometrischen Scansystemen arbeitet dieses System mit drei Laserlinien mit unterschiedlichen Wellenlängen: 637 nm (rot), 516 nm (grün) und 419 nm (blau) (Abb. 6). Dies führt zu einer Verdichtung der Punktwolke und zur Steigerung der Messgenauigkeit. Die spezielle Farbkamera ist besonders für schwaches Licht ausgelegt. Mit Hilfe der integrierten Beleuchtung können normale RGB-Bilder unter Wasser gemacht werden. Zum einen können diese Bilder genutzt werden, um die Punktwolken einzufärben, zum anderen können Bildverbände zur Bestimmung der Scanposition unter Wasser berechnet und die Ergebnisse zur Bewegungskompensation genutzt werden. So ist ein Scannen im Profiling-Modus möglich. Mit dem SeaVision-Lasersystem lassen sich 300 000 Punkte pro Sekunde bestimmen. Der Scanbereich wird mit 0,5 m bis zu 8 m Entfernung angegeben. Dabei liegt die Scanauflösung laut Kraken bei einer Entfernung von 2 m zwischen 0,1 mm und 3 mm, bei einer Entfernung von 5 m zwischen 1 mm und 10 mm. Eine Röhre hat die Abmaße von 460 mm \times 113 mm und wiegt an der Luft 7 kg. Das System kann mit unterschiedlichen Auflösungen scannen,

wobei in der niedrigsten Auflösung Scanzeiten von wenigen Sekunden erreicht werden. Die Kamera arbeitet mit einer konstanten Belichtungszeit. Unter- bzw. Überbelichtungseffekte werden durch verschiedene Empfindlichkeitsstufen des Kamerasensors, die herstellerseitig als GAIN-Werte benannt werden, kompensiert (Niemeyer et al. 2019).

Stereokamerasystem vom Fraunhofer IGD

Das Unterwasserkamerasystem des Fraunhofer IGD besteht aus drei Druckgehäusen (Abb. 7). Jedes Druckgehäuse ist für eine Wassertiefe von 70 m ausgelegt. Eine Verbindung zur Wasseroberfläche ist über ein Ethernet-Kabel möglich. Zwei der Druckgehäuse sind für den Einbau von Kameras ausgelegt. Das dritte Gehäuse hat einen Durchmesser von 18 cm und eine Länge von 32,6 cm. Damit bietet es zusätzlichen Raum für Rechenmodule oder sonstige Peripherie. Der modulare Aufbau ermöglicht verschiedene Konfigurationen. Die im Rahmen der durchgeführten Experimente eingesetzte Konfiguration umfasst alle drei Druckgehäuse (Abb. 8). Damit ist ein Betrieb als Stereokamera mit einer variablen Basis im Bereich von 12 bis 30 cm möglich. Der Betrieb als Einzelkamera

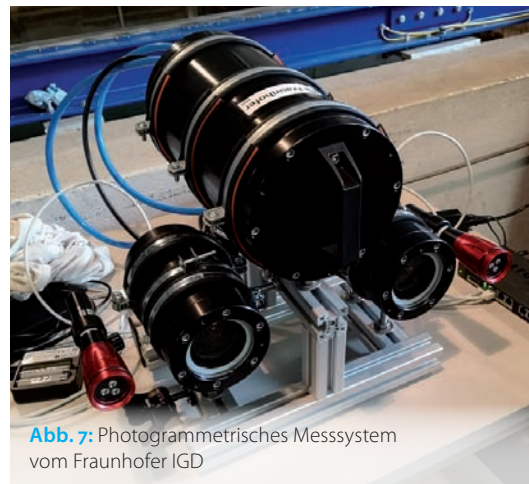


Abb. 7: Photogrammetrisches Messsystem vom Fraunhofer IGD



Abb. 8: Photogrammetrisches Messsystem vom Fraunhofer IGD im Einsatz unter Wasser (Blick von oben ins Wasserbecken)

Literatur

2GRobotics (o. J.): ULS-200 Data Sheet; online unter www.2grobotics.com/ULS-200_Data_Sheet.pdf, zuletzt geprüft am 11.03.2019

2GRobotics (2018): Accurate Pipe Profiling; online unter www.2grobotics.com/accurate-pipe-profiling/, zuletzt geprüft am 08.02.2019

3D at Depth (2018): 3D at Depth Expands Underwater Survey Services; online unter www.3datdepth.com/news/3d-at-depth-expands-underwater-survey-services, zuletzt geprüft am 08.02.2019

Bräuer-Burchardt, Christian; Peter Kühmstedt; Gunther Notni (2015): Optische 3D-Messtechnik auf Musterprojektionsbasis für den Unterwassereinsatz; in: Uwe Freiherr von Lukas, Eva-Maria Mahnke und Kristine Bauer (Hrsg.): Go-3D 2015 »Computergraphik für die Praxis«; Tagungsband zur Konferenz Go-3D 2015; Fraunhofer-Verlag, S. 141-153

Bulow, Heiko; Igor Sokolovski; Max Pflingstorn; Andreas Birk (2013): Underwater stereo data acquisition and 3D registration with a spectral method; 2013 MTS/IEEE OCEANS, Bergen, S. 1-7

Dolereit, Tim (2017): A virtual object point model for the calibration of underwater stereo cameras to recover accurate 3D information; Dissertation, Universität Rostock, online unter rosdok.uni-rostock.de/resolve/id/rosdok_disshab_0000001980, zuletzt geprüft am 16.03.2019

Ekkel, Tanja; Thomas Luhmann; Anna Maria Meyer; Niklas Conen; Heidi Hastedt; Folkmar Bethmann (2014): Präzise optische dreidimensionale Erfassung von Schweißnähten unter Wasser; in: Fachzeitschrift für Schweißen und verwandte Verfahren 2014

Hardy, Mark (2018): Bringing Laser Scanning to New Depths in the Subsea Oil and Gas Market; LIDAR News Magazine, Vol. 5, No. 2

Henderson, Jon; Oscar Pizarro; Matthew Johnson-Roberson; Ian Mahon (2013): Mapping Submerged Archaeological Sites using Stereo-Vision Photogrammetry; International Journal of Nautical Archaeology, Vol. 42, No. 2, S. 243-256

Hildebrandt, Marc; Jochen Kerdels; Jan Albiez; Frank Kirchner (2008): A practical underwater 3D-Laserscanner; OCEANS 2008, Quebec City, QC, Canada, S. 1-5

mit nur einem Druckgehäuse ist zudem problemlos möglich. Zwei optionale LED-Tauchlampen dienen der Beleuchtung. Die beiden Kameragehäuse haben einen Durchmesser von 11,5 cm, eine Länge von 19,1 cm und eine Glasdicke von 1 cm. Die Bauform und der Ethernet-Anschluss sind hierbei die einzigen einschränkenden Faktoren für die Auswahl und den Einbau von Kameras.

In der Stereokonfiguration werden aktuell zwei hochauflösende Farbkameras der IDS Imaging Development Systems GmbH vom Typ UI-5880CP Rev. 2 eingesetzt. Diese Kamera ermöglicht eine Framerate von ca. 18 fps bei einer maximalen Auflösung von 3088 x 2076 Pixeln. Eine Langzeitbeleuchtung von bis zu 120 Sekunden ist möglich. Beim Bildsensor handelt es sich um den CMOS-Sensor Sony IMX178. Dieser 1/1,8" große Sensor zeichnet sich durch seine lichtempfindlichen Pixel mit 2,4 µm Pixelgröße aus. Die Kameras haben einen großen Dynamikbereich, liefern kontrastreiche Bilder und sind extrem rauscharm. Diese Eigenschaften sind besonders im Unterwasserbereich von Vorteil. Die eingesetzten Objektive haben eine Brennweite von 6 mm. Daraus ergeben sich ein horizontaler Bildwinkel von ca. 63° und ein vertikaler Bildwinkel von ca. 45°. Der Interface-Standard der Kamera ist GigE. In der aktuellen Konfiguration kann pro Kamera eine Framerate von ca. 7 fps bei voller Auflösung erzielt und an die Wasseroberfläche übertragen werden. Die Synchronisierung der beiden Kameras ist in der aktuellen Konfiguration durch ein Softwaretriggering realisiert. Die Stromversorgung der Hardware wird über Power-over-Ethernet (PoE) bereitgestellt. An der Wasseroberfläche befindet sich die Hardware zur Bildaufzeichnung. Dies kann ein herkömmliches Notebook mit GigE-Interface sein.

Die Datenverarbeitung ist in das Postprocessing der Aufnahmen ausgelagert. Die notwendigen Arbeitsschritte für die Erstellung der 3D-Punktwolke umfassen die Kalibrierung der Stereokamera, die Entzerrung der Aufnahmen, das Finden korrespondierender Bildpunkte in rechter und linker Ansicht und eine Triangulierung zur Berechnung der 3D-Punkte. Die Besonderheit der auftretenden Lichtbrechung an den Medienübergängen zwischen Wasser, Glas und Luft wurde berücksichtigt. Diese Lichtbrechung hat direkte Auswirkungen auf die Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion und sollte auf keinen Fall unberücksichtigt bleiben. Die umgesetzte Datenverarbeitung basiert auf einer Absorption der Brechungseffekte durch die kalibrierten Kameraparameter. Diese Absorption wird durch eine Kalibrierung unter Wasser erreicht. Dabei werden mit Hilfe einer Tafel mit einem Schachbrettmuster sowohl die inneren Orientierungsparameter der Kameras als auch die relative Orientierung der Kameras zueinander bestimmt.

Messumgebung

Die Messungen wurden im Schleppkanal des Lehrstuhls für Strömungstechnik der Universität

Rostock durchgeführt (Abb. 9). Zusätzlich wurde das SeaVision-Lasersystem in der Ostsee nahe des künstlichen Riffs bei Nienhagen (Abb. 10) unter realistischeren Bedingungen getestet.

Der Schleppkanal hat eine Länge von 37 m, eine Breite von 5 m und eine maximale Wassertiefe von 3 m. Die Messkonfigurationen im Schleppkanal wurden so konzipiert, dass der Abstand zwischen Prüfbjekt und Scansystem verändert werden kann. Hierfür wurden die Prüfbjekte auf dem Beckenboden positioniert. Die Scansysteme waren am Schleppwagen befestigt und unter Wasser auf die Prüfbjekte ausgerichtet. Durch Bewegung des Schleppwagens wurden unterschiedliche Messpositionen eingenommen.

Folgende Messungen wurden im Schleppkanal in Kombination mit dem Prüfkörper vorgenommen:

- ULS-200-Scansystem:
Messabstände: 0,95 m, 2,3 m und 3,7 m; für weitere Messungen stand das System nicht zur Verfügung.
- SeaVision-Lasersystem:
Abstand: ca. 1,58 m; ein Scan wurde mit festem Standpunkt und ein Scan im Profilmodus durchgeführt. Dabei wurde der Scanner mit Hilfe des Schleppwagens mit konstanter Geschwindigkeit an den Prüfbjekten während des Scanvorgangs vorbeigeführt.
- Stereokamerasystem vom Fraunhofer IGD:
Es wurden zahlreiche verschiedene Aufnahmen im Bereich zwischen 1,5 m und 2,8 m durchgeführt. Die Aufnahmezeit war dabei nur von der Belichtungszeit der Kameras abhängig. Fünf Messungen wurden exemplarisch für weitere Betrachtungen ausgewählt.



Abb. 9: Schleppkanal des Lehrstuhls für Strömungstechnik der Universität Rostock



Abb. 10: Messungen mit spezieller Rahmenkonstruktion in der Ostsee nahe des künstlichen Riffs Nienhagen

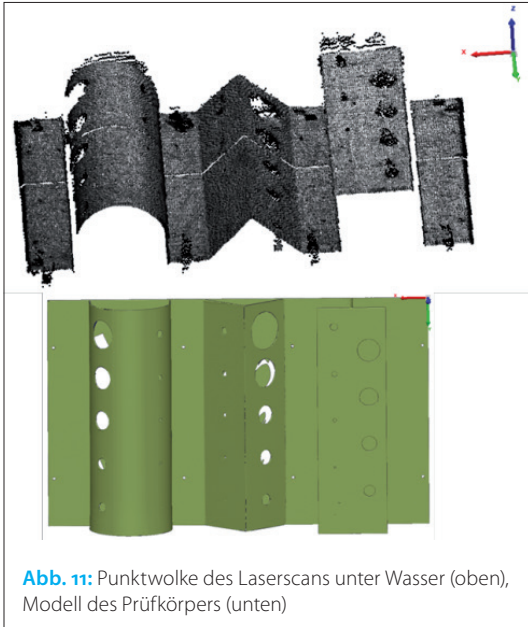


Abb. 11: Punktwolke des Laserscans unter Wasser (oben), Modell des Prüfkörpers (unten)

Bild aus: Niemeyer et al. 2019

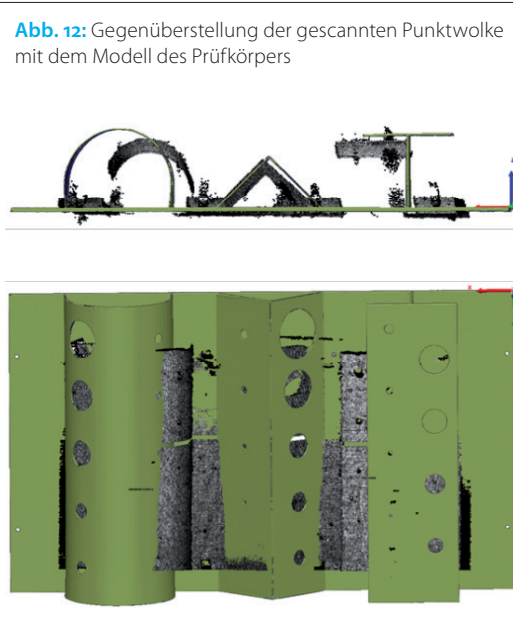


Abb. 12: Gegenüberstellung der gescannten Punktwolke mit dem Modell des Prüfkörpers

Bild aus: Niemeyer et al. 2019

Die Messungen in der Ostsee gestalteten sich etwas schwieriger. Für diese Zwecke wurde ein zweiteiliges Rahmensystem verwendet, mit dessen Hilfe Scansystem und Prüfobjekte starr zueinander ausgerichtet werden konnten (Abb. 10). Mit Hilfe eines Krans wurde die ganze Konstruktion ins Wasser abgelassen. Die Prüfobjekte können in drei verschiedenen Abständen zum Scanner positioniert werden. Zudem ist es möglich, nur den Rahmenteil mit Scanner ohne Prüfkörperteil ins Wasser abzulassen, um Scans von Strukturen unter Wasser vorzunehmen. Zum Einsatz kam hier lediglich das SeaVision-Lasersystem. Die Messungen in der Ostsee wurden für den dichten (1,2 m) und den weitesten Abstand (2,7 m) zwischen Messsystem und Prüfobjekten in drei Wassertiefen (1 m, 6 m, 12 m) vorgenommen. Zudem wurde die Empfindlichkeit der Kamera (GAIN-Werte 10, 15, 20, 25) in vier Schritten in jeder Messkonfiguration vorgenommen. (Für eine detaillierte Auswertung siehe Niemeyer et al. 2019.)

Auswertung und Ergebnisse

Die Messungen der einzelnen Systeme fanden zu unterschiedlichen Zeitpunkten innerhalb von zehn Monaten statt. Während dieser Zeit wurde auch der Prüfkörper weiterentwickelt. Bei den anfänglichen Messungen mit dem ULS-System waren leider noch keine Messmarken angebracht. Bei den Messdatenauswertungen fiel auf, dass die gemessenen Punktwolken in ihren Ausmaßen nicht 100%ig mit dem Modell des Prüfkörpers übereinstimmten. Für die weiteren Untersuchungen wurden daher die Punktwolken mittels eines Maßstabsfaktors gleichmäßig skaliert. Abb. 11 und Abb. 12 zeigen exemplarisch eine in der Ostsee mit dem SeaVision-Lasersystem gemessene Punktwolke im Verhältnis zum 3D-Modell. Anschließend wurden Untersuchungen zu Streupunktanteilen und Messrauschen durchgeführt.

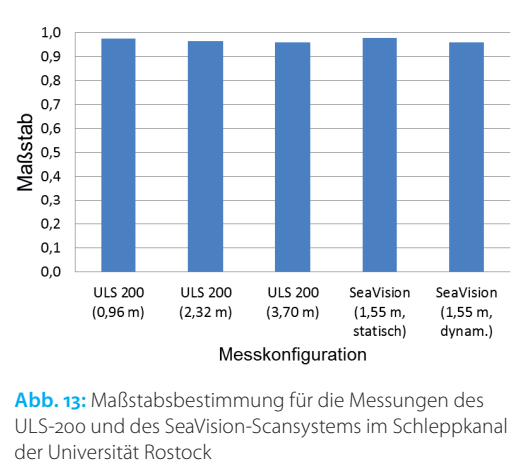


Abb. 13: Maßstabsbestimmung für die Messungen des ULS-200 und des SeaVision-Scansystems im Schleppkanal der Universität Rostock

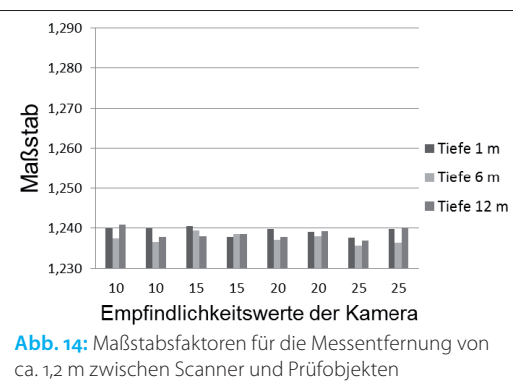


Abb. 14: Maßstabsfaktoren für die Messentfernung von ca. 1,2 m zwischen Scanner und Prüfobjekten

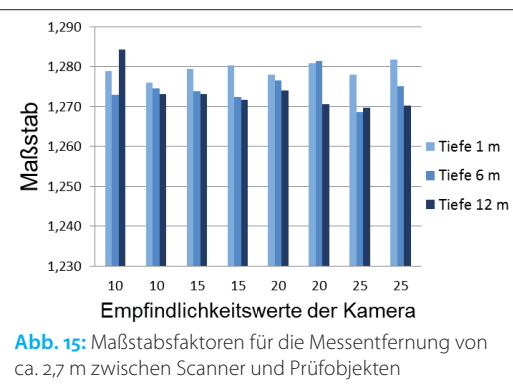


Abb. 15: Maßstabsfaktoren für die Messentfernung von ca. 2,7 m zwischen Scanner und Prüfobjekten

...
 Iscar, Eduardo; Katherine A. Skinner; Matthew Johnson-Roberson (Hrsg.) (2017): Multi-view 3D reconstruction in underwater environments: Evaluation and benchmark; OCEANS 2017, Anchorage
 Iscar, Eduardo; Matthew Johnson-Roberson (2015): Autonomous surface vehicle 3D seafloor reconstruction from monocular images and sonar data; OCEANS 2015 - MTS/IEEE, Washington, DC, S. 1-6
 Johnson-Roberson, Matthew; Mitch Bryson; Ariell Friedman; Oscar Pizarro; Giancarlo Troni; Paul Ozog; Jon C. Henderson (2017): High-Resolution Underwater Robotic Vision-Based Mapping and Three-Dimensional Reconstruction for Archaeology; Journal of Field Robotics, Vol. 34, No. 4, S. 625-643
 Kraken Robotik (2018): 3D RGB Underwater Laser Scanner SeaVision; online unter krakenrobotics.com/products/seavision/, zuletzt geprüft am 11.03.2019
 Lucht, Joschka van der; Michael Bleier; Florian Leutert; Klaus Schilling; Andreas Nüchter (2018): Korrektur der Brechung an der Wasseroberfläche beim triangulationsbasierten 3D-Laserscanner; in: Thomas Luhmann; Christina Schumacher (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018; Wichmann – VDE, Berlin, S. 87-102
 Łuczynski, Tomasz; Max Pflingsthorn; Andreas Birk (2017): The Pinax-model for accurate and efficient refraction correction of underwater cameras in flat-pane housings; Ocean Engineering, Vol. 133, S. 9-22
 Manning, Neil (2014): Teledyne CDL; Oceanology, 2014; online unter www.oceanologyinternational.com/novadocuments/49895?v=635315295396130000, zuletzt geprüft am 27.02.2019
 Nawaf, Mohamad Motasem; Djamel Merad; Jean-Philip Royer; Jean-Marc Boi; Mauro Saccone; Mohamed Ben Ellefi; Pierre Drap (2018): Fast Visual Odometry for a Low-Cost Underwater Embedded Stereo System; Sensors, Vol. 18, No. 7
 ...

Bild aus: Niemeyer et al. 2019

Bild aus: Niemeyer et al. 2019

Niemeyer, Frank; Matthias Neumann; Jan Albiez; Alexander Duda; Michael Geist (2019): Untersuchungen zu Messgenauigkeit von Laserscannern unter Wasser am Beispiel des SeaVision™ 3D Laser System; in: Thomas Luhmann; Christina Schumacher (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2019; Wichmann – VDE Verlag, Berlin

Pfingsthorn, Max; Ravi Rathnam; Tomasz Łuczynski; Andreas Birk (2016): Full 3D navigation correction using low frequency visual tracking with a stereo camera; OCEANS 2016, Shanghai, China, S. 1-6

Rossi, Matija; Petar Trsljić; Satja Sivčev; James Riordan; Daniel Toal; Gerard Dooly (2018): Real-Time Underwater Stereo Fusion; Sensors, Vol. 18, No. 11

Schlüter, Martin (2002): Trackingsysteme für handgeführte 3D-Scanner – mechanisch, optisch, interferometrisch; in: Eckhardt Seyfert (Hrsg.): Zu neuen Märkten – auf neuen Wegen – mit neuer Technik; 22. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung; Publikationen der DGPF, Vol. 11, S. 187-194

Stemmler, Simon; Christoph S. Werner; Alexander Reiterer (2019): Development of a time-of-flight laser scanning system for underwater applications; Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019, Strasbourg, im Druck

Skalierung

Das ULS-200-Scansystem war herstellerseitig vorkalibriert. Eine Kalibrierung vor der Messung fand nicht statt. Die Kalibrierungsparameter wurden übernommen. Da zum Zeitpunkt der Messungen noch keine Marken zur Maßstabsbestimmung auf dem Prüfobjekt verklebt waren, wurde der Maßstab mit Hilfe der Gesamtgeometrie über Fitting-Methoden bestimmt. Das SeaVision-Lasersystem und das photogrammetrische System wurden im Schleppkanal im Vorfeld mit Hilfe von speziellen Tafeln mit Schachbrettmustern kalibriert. Da während der Messungen bereits Marken angebracht waren, konnten hierüber Korrekturmaßstäbe bestimmt werden.

Die Ergebnisse der Maßstabsbestimmung sind in Abb. 13 (S. 21) dargestellt. Die Werte liegen zwischen 0,978 und 0,960. Für das photogrammetrische System konnten keine Maßstabsfaktoren bestimmt werden, da die berechneten Punktwolken an den Markenpositionen zu stark variierten (Abb. 22, S. 23).

Die Ergebnisse der Maßstabsbestimmungen des SeaVision-Lasersystems in der Ostsee sind in Abb. 14 und Abb. 15 (S. 21) dargestellt. Für den Abstand von 1,2 m liegen die Maßstäbe zwischen 1,236 und 1,241 und für den Abstand von 2,7 m liegen die Maßstäbe zwischen 1,269 und 1,284 (siehe Niemeyer et al. 2019).

Streupunktanteile und Messrauschen

Die Qualität der gemessenen Punktwolke hängt bei kamerabasierten Aufnahmesystemen von Umgebungsbedingungen, wie z. B. Umgebungsbeleuchtung und Schwebstoffe im Sichtbereich, ab. So erkennt man beispielsweise bei trigonometrischen Scans vermehrt Streupunkteffekte in der Nähe von Kanten bei Überbelichtung (Abb. 16, oben links ausgegraute Punkte). Zudem erkennt man vereinzelt auch losgelöste Punkte, die sich jedoch leicht durch eine vorgelagerte Punktwolkenbereinigung entfernen lassen.

Außerdem unterliegt jedes Messsystem einer

Messgenauigkeit bzw. einem Messrauschen. Das Messrauschen gibt an, wie stark beispielsweise gemessene Punkte um eine Ebene (oder eine Regelgeometrie) variieren. Streupunkte und Messrauschen überlagern sich und können nur schwer getrennt werden. Für die praktischen Untersuchungen in diesem Paper wurde folgendes Trennkriterium angewendet:

Bevor eine Trennung zwischen Messrauschen und Streupunkten stattfinden kann, müssen die Punktwolken mittels Maßstabsfaktor nachskaliert und Punktwolkenbereinigungen durchgeführt werden. Danach findet eine Ausrichtung der Punktwolke zum Referenzmodell mittels Fitting-Methoden statt. Eine simultane Bestimmung des Maßstabsfaktors während des Fitting-Verfahrens ist nicht ratsam, da hier Streupunkte, die nicht zum Messobjekt gehören, das Ergebnis verfälschen würden. Anschließend wurden die Abweichungen zwischen Punktwolke und Referenzmodell bestimmt. In den einzelnen Scans waren homogene ebene Bereiche zu finden, in denen keine Streupunkte identifiziert werden konnten (Abb. 16, rechts). Über die Bestimmung von maximalen und minimalen Abweichungen lässt sich für diese Bereiche eine Spanne berechnen. Zur automatischen Klassifizierung und Zuordnung der Messpunkte zur Prüfebene wird eine Toleranzzone festgelegt, die der dreifachen Spanne entspricht. Schließlich wurden alle Punkte mit Abweichungen innerhalb der dreifachen Spanne rund um das Modell für die Bestimmung des Messrauschens verwendet und die übrigen Punkte als Streupunkte deklariert. In Abhängigkeit des Messrauschens wurde die Spanne für jeden einzelnen Scan individuell bestimmt. Nachdem die Streupunkte identifiziert und entfernt wurden, fand nochmals ein Best-Fit statt und das Messrauschen konnte bestimmt werden. In Abb. 17 (S. 23) sind die Streupunktanteile für das ULS-200-Scansystem und das SeaVision-Lasersystem für die Messungen im Schleppkanal dargestellt.

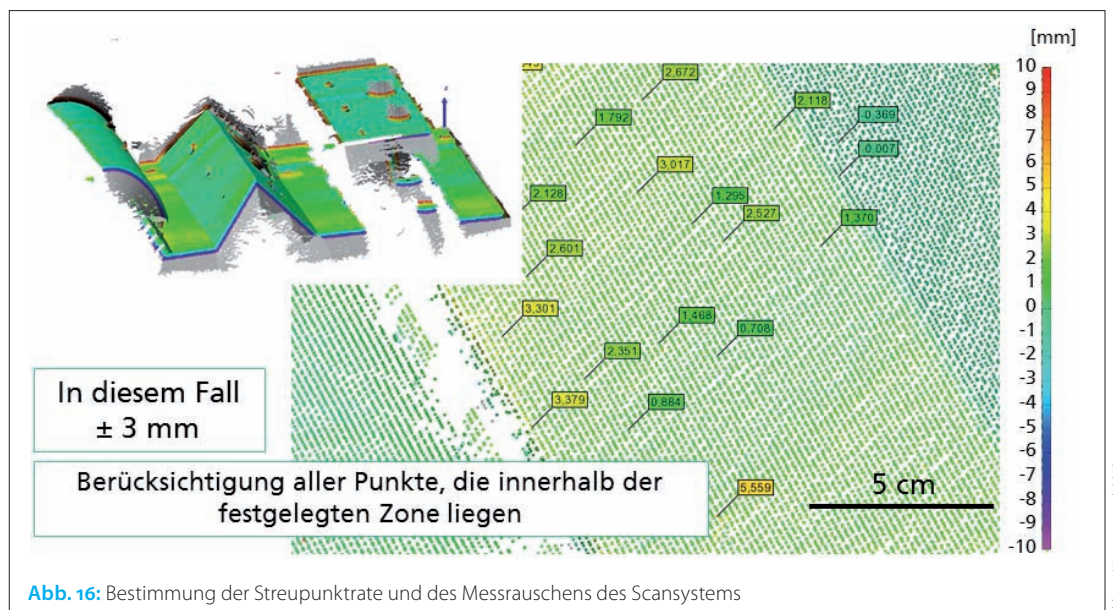


Abb. 16: Bestimmung der Streupunktrate und des Messrauschens des Scansystems

Bild aus: Niemeyer et al. 2019

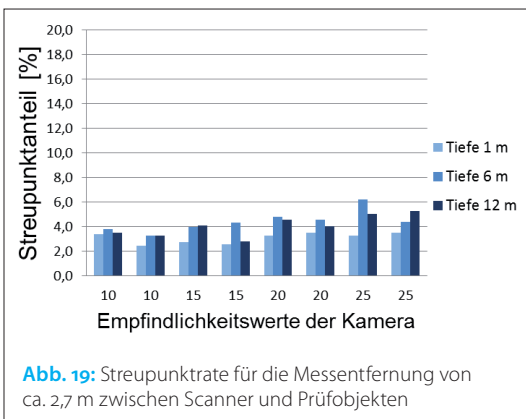
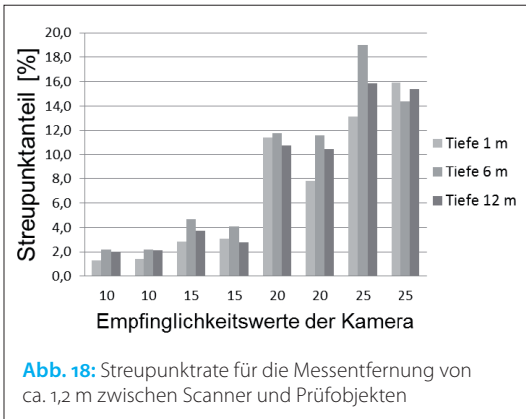
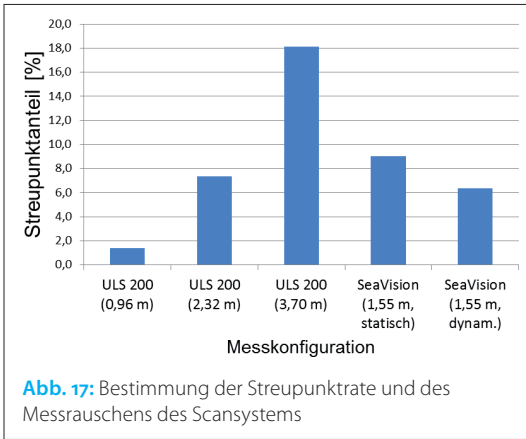
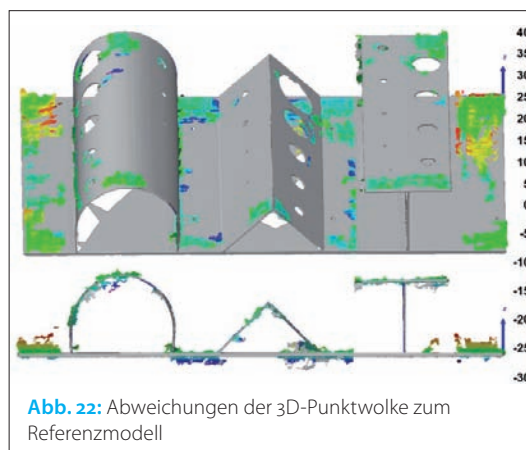
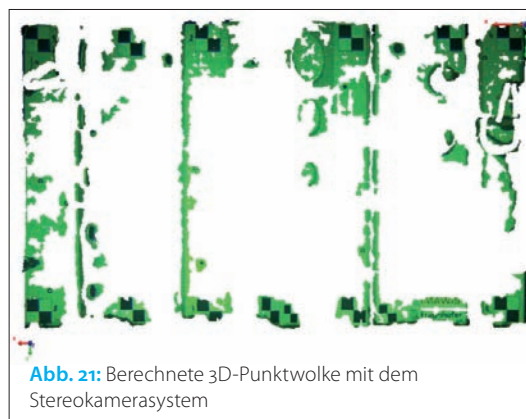
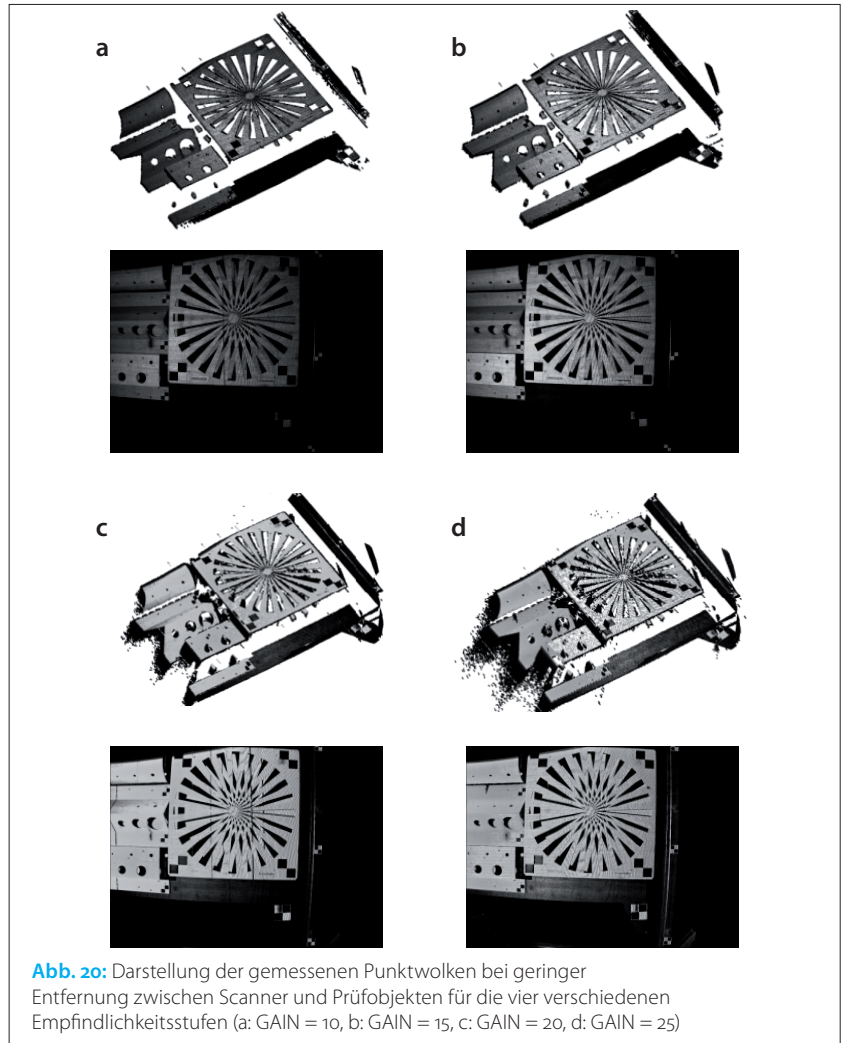


Bild aus: Niemeier et al. 2019

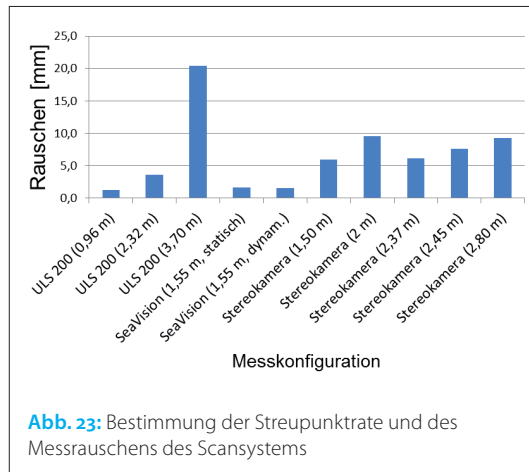
Bild aus: Niemeier et al. 2019



Die Streupunktanteile für die Messung in der Ostsee sind in [Abb. 18](#) für die Messentfernung zwischen Scansystem und Prüfobjekten von 1,2 m und in [Abb. 19](#) für eine Messentfernung von 2,7 m dargestellt.

Beispielhaft sind die Streupunkte der gemessenen 3D-Punktwolken in [Abb. 20](#) (jeweils oben) dargestellt. Darunter sieht man die Kamerabilder, die in verschiedenen Empfindlichkeitsstufen des Kamerasensors gemacht wurden.

Beim Stereokamerasystem konnten keine Streupunkte festgestellt werden. Die 3D-Punktwolken weisen hingegen große löchrige Bereiche auf ([Abb. 21](#)). Die berechneten Punktwolken des Stereokamerasystems konnten wegen der farblichen Homogenität des Prüfkörpers lediglich zwischen 25 % und 35 % der sichtbaren Oberfläche in allen Aufnahmen abdecken. [Abb. 22](#) zeigt eingefärbt die Abweichungen der Messpunkte zum Prüfkörper.



Das Messrauschen für die Messungen der einzelnen eingesetzten Aufnahmesysteme im Schleppkanal ist in [Abb. 23](#) gegenübergestellt. Exemplarisch ist in [Abb. 24](#) das Messrauschen des ULS-200-Scansystems für verschiedene Abstände dargestellt.

In [Abb. 25](#) (S. 25) ist das Messrauschen des SeaVision-Lasersystems für die Messungen in der Ostsee für die Messentfernung von 1,2 m und in [Abb. 26](#) (S. 25) für die Messentfernung von 2,7 m dargestellt.

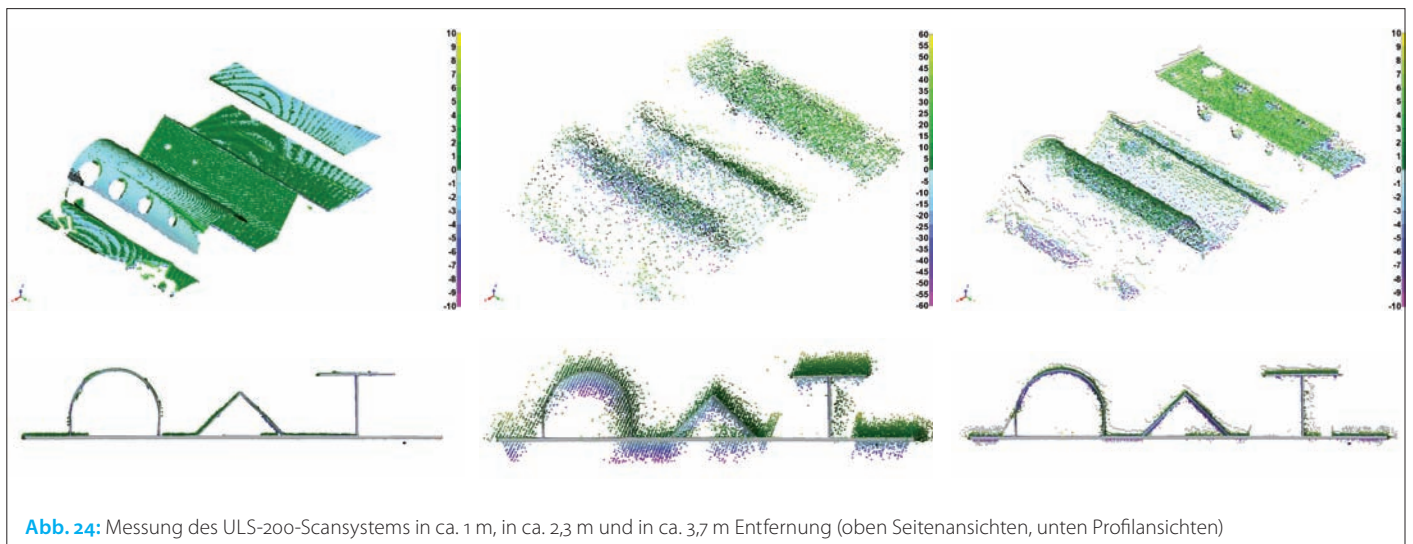
Diskussion

Sowohl das photogrammetrische als auch das trigonometrische Vermessungsverfahren basieren auf der linearen Ausbreitung von Lichtstrahlen. Licht wird beim Übergang zweier unterschiedlich dichter Medien gebrochen. Jede Lichtbrechung muss in den Berechnungsmodellen berücksichtigt werden. Bei den Messsystemen finden Medienbrüche zwischen Luft (Kamerainneres), Glas (Linsensystem, Fensterscheibe) und Wasser statt. Zusätzliche Dichteunterschiede können auch in der Wassersäule stattfinden, z. B. in der Ostsee durch unterschiedliche Salzgehalte. Werden diese Einflüsse nicht richtig modelliert, kommt es zu Maßstabs- bzw. Verzerrungseffekten.

Das ULS-200-Scansystem war während der Messungen leicht zu handhaben. Die gemessenen

Punktwolken mussten kaum maßstäblich korrigiert werden. Für den Nahbereich erreicht dieses System ein Messrauschen von ca. 1,3 mm bei knapp 1 m Entfernung. Bei 2,3 m Entfernung stieg das Messrauschen auf 3,6 mm an. Im Abstand von 3,7 m, was schon außerhalb des Messbereichs des ULS-200 liegt, konnten dennoch Messungen durchgeführt werden. Das Messrauschen lag dabei bei 20,4 mm. Parallel ist die Zunahme der Streupunkte zu beobachten, die zwischen 1,4 % und 18 % lagen. Durch die starre Verbindung zwischen Kamera und Lasermodul lassen sich keine anderen Messbereiche einstellen. 360°-Rundumschans sind möglich. Das ULS-200-Scansystem erreicht damit schon sehr gute Ergebnisse für den vorgegebenen Messbereich. Viele Messaufgaben können mit ihm unter Wasser bereits gelöst werden. Die Messgenauigkeiten von terrestrischen Laserscannern über Wasser werden jedoch nicht erreicht.

Das SeaVision-Lasersystem gehört zu den leistungsstärkeren Scansystemen. Auch hier mussten kaum maßstäbliche Korrekturen bei den Messungen im Schleppkanal vorgenommen werden. Durch die variabel einstellbare Basislänge zwischen den Druckkörpern, können verschiedene Messbereiche explizit beobachtet werden. Mit einer Messrate von 300 000 Punkten pro Sekunde können Scans in wenigen Sekunden vorgenommen werden. Bei den Messungen im Schleppkanal wurde ein Messrauschen zwischen 1,5 mm und 1,6 mm bei einer Entfernung von ca. 1,5 m beobachtet, was vergleichbar mit dem ULS-200-Scansystem ist. Die Streupunkteanteile lagen mit 6,3 % und 9 % geringfügig höher als beim ULS-200-Scansystem. Bei den Messungen in der Ostsee unter realistischen Bedingungen wurde für den Messabstand von 1,2 m ein Messrauschen zwischen 1,4 mm bis 2 mm und für den Messabstand von 2,7 m ein Messrauschen von ca. 4 mm festgestellt. Durch die Umgebungsbedingungen und die unterschiedlichen Beleuchtungseffekte ergaben sich für den nahen Bereich Streupunkteanteile bis zu 18 % und für den weiten Bereich bis zu 6 %. Die maßstäblichen Korrekturen liegen mit Werten um die 1,238



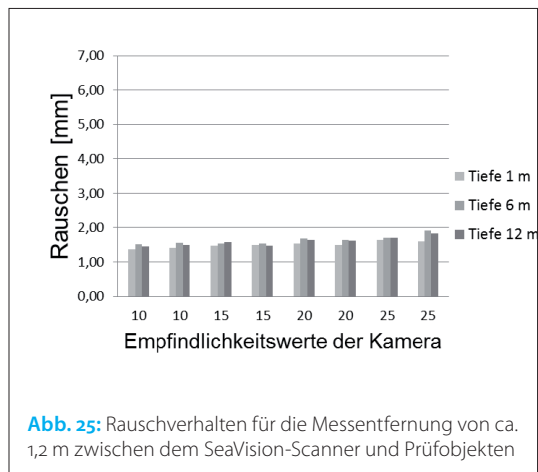


Abb. 25: Rauschverhalten für die Messentfernung von ca. 1,2 m zwischen dem SeaVision-Scanner und Prüfbjekten

Bild aus: Niemeier et al. 2019

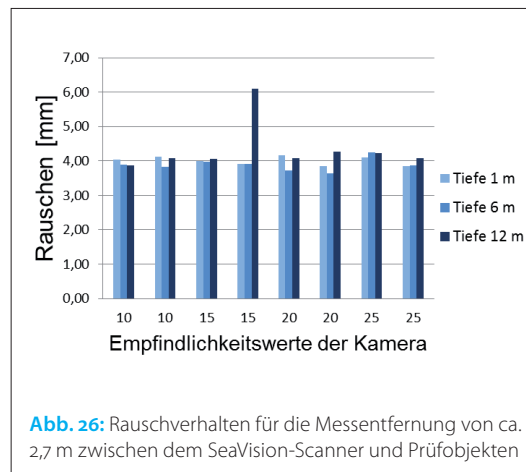


Abb. 26: Rauschverhalten für die Messentfernung von ca. 2,7 m zwischen dem SeaVision-Scanner und Prüfbjekten

Bild aus: Niemeier et al. 2019

für den nahen Bereich und 1,276 für den weiten Bereich insgesamt etwas höher.

Das Stereokamerasystem ist in der Lage, mit einer Framerate von 7 fps den Aufnahmebereich zu erfassen (Dolereit 2017). Diese Messgeschwindigkeit wird von den trigonometrischen Systemen nicht erreicht. Dabei hängt die Messqualität stark von der Beleuchtung und von der farblichen Inhomogenität des Messobjekts ab. Durch die farbliche Homogenität der Beschichtung ist das Prüfbjekt für photogrammetrische Anwendungen eher weniger geeignet. Dennoch sollte zu Vergleichszwecken der Prüfkörper verwendet werden. Im Gegensatz zu den trigonometrischen Scansystemen wird ein Messrauschen zwischen 6 mm und 10 mm erreicht. Dabei wurden erwartungsgemäß farblich homogene Bereiche nicht abgebildet, was zu einer Abdeckung des Messbereichs zwischen 25 % und 35 % der sichtbaren Oberfläche in allen Aufnahmen führte. Da Kanten und Öffnungen jedoch farbliche Unterschiede hervorrufen und zudem wichtige Orientierungsmerkmale an einer Struktur sind, ließen sich photogrammetrische Aufnahmesysteme im Unterwasserbereich, vorausgesetzt, die Sichtbarkeit ist gegeben, als Positions- und Orientierungssysteme verwenden. Maßstabsfaktoren konnten nicht bestimmt werden, da die Punktwolken um die Marken herum zu stark variierten.

Allgemein können mit den getesteten Systemen gute bis sehr gute Messergebnisse bei der geometrischen Erfassung von Unterwasserstrukturen erzielt werden. Die Einflussfaktoren sind unter Wasser sehr zahlreich und beeinflussen die Messungen. Streupunkte sind von der Leuchtquelle und der Belichtungszeit der Kamera abhängig. Der Messbereich und die Messgenauigkeit hängen von der Messkonfiguration, z. B. der Basislänge zwischen den Kameras bzw. der Kamera und dem Lasermodul, ab. Für die Untersuchungen wurden die maßstäblichen Korrekturen gleichmäßig auf die Punktwolken angewendet, jedoch können wegen unterschiedlicher Brechungswinkel auch nichtlineare Verzerrungen in den 3D-Punktwolken auftreten, die aber nicht Gegenstand dieses Papers sein sollten. Zudem wurden verschiedene Maßstä-

be für unterschiedliche Messbereiche bei gleichen Kalibrierungsparametern festgestellt. Umfassende Kalibrierungen sind daher notwendig. Da sich die Umgebungsbedingungen während einer Messkampagne ändern können, sollten Kalibrierungen simultan zu den Messungen vorgenommen werden.

Je nach Anwendungsfall können optische Systeme zur Vermessung unter Wasser eingesetzt werden. Preiswerte photogrammetrische Systeme reichen für viele Aufgaben aus, haben jedoch Schwächen in der Messgenauigkeit und im Umgang mit homogenen Flächen. Dafür eignen sie sich für Echtzeitanwendungen z. B. zur Navigation. Für anspruchsvollere Messaufgaben kommen eigentlich nur aufwendigere Laser-basierte Systeme infrage.

Ausblick

Durch die weiter voranschreitende Erschließung des Unterwasserbereichs werden auch mehr Überwachungs- und Inspektionssysteme zur Anwendung kommen. Optische Scansysteme zur geometrischen Erfassung von Strukturen unter Wasser werden hierfür immer wichtiger. //

Danksagung

Um Messungen im Bereich unter Wasser durchzuführen, bedurfte es einer umfangreichen Planung und Organisation. Wir danken daher dem Institut für Ostseeforschung in Warnemünde für die Bereitstellung des ULS-200-Scansystems und der Kraken Robotik GmbH aus Bremen für die Bereitstellung des SeaVision-Lasersystems sowie für die Unterstützung bei den Messungen. Zudem danken wir dem Lehrstuhl für Strömungstechnik der Universität Rostock für die Möglichkeit, dort Messungen unter laborähnlichen Bedingungen unter Wasser durchführen zu können. Der Baltic Taucher GmbH sei für die Unterstützung bei den Messungen in der Ostsee gedankt. Zudem sei dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Projektförderung (Förderkennzeichen 03WKCR4D) gedankt.