

---

# Korrektur der Brechung an der Wasseroberfläche beim triangulationsbasierten 3D Laserscannen

Joschka VAN DER LUCHT, Michael BLEIER, Florian LEUTERT, Klaus SCHILLING  
und Andreas NÜCHTER

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Korrektur der Brechung an der Wasseroberfläche beim triangulationsbasierten 3D Laserscannen. Hierzu wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, mit einem Structured Light (SL) System 3D-Daten von teilweise mit Wasser bedeckten Strukturen anzufertigen und die dabei entstehende Brechung an der Wasseroberfläche zu korrigieren. Diese wurde anschließend in einem Versuchsaufbau evaluiert. Der Scanner wurde dabei an einem KUKA KR-16 Manipulatorarm befestigt, was die Möglichkeit bietet den Scanner gleichmäßig, definiert und wiederholbar zu bewegen. Die Bewegungen des Scanners wurden dabei durch ein externes Trackingsystem erfasst. Ebenfalls wurde bei diesen Versuchen der Einfluss verschiedener Einstrahlwinkel betrachtet. Zu diesem Zweck wurde der Scanner in verschiedenen Winkeln relativ zur Wasseroberfläche bewegt. Durch die entwickelte Methode konnten Fehler durch die Brechung an der Wasseroberfläche erfolgreich korrigiert werden. Außerdem konnte die Lage der Wasseroberfläche ohne externe Markierungen aus den 3D-Daten bestimmt werden.

## 1 Einleitung

In unzähligen Anwendungen ist es notwendig, 3D-Scans von teilweise im Wasser befindlichen Objekten anzufertigen. In diesen Fällen ist es meist unmöglich das Objekt aus dem Wasser zu entfernen, da es entweder zu groß ist oder durch eine Bergung zerstört oder beschädigt werden würde. Vor allem in der Archäologie ist es von großer Bedeutung das Objekt nicht weiter zu beschädigen und dennoch einen möglichst genauen und vollständigen Datensatz zu erstellen.

Ein weiteres interessantes Einsatzgebiet bietet die Dokumentation von havarierten Schiffen, wie zum Beispiel der Costa Concordia. Soll beispielsweise von einem solchen Schiff oder auch einer Statue, die nur zum Teil von Wasser bedeckt ist, ein 3D-Modell erstellt werden, so ist gerade hier der Grenzbereich zwischen Wasser und Luft wichtig für das gesamte Modell und die Verwertbarkeit der Punktwolke. Durch Wellen und Gezeiten können mit den momentan verwendeten Methoden, die entweder über oder unter Wasser arbeiten, zusätzliche Probleme auftreten, da die Höhe der Wasserkante in kurzen Zeitintervallen stark variieren kann. Ohne die Verwendung von zusätzlich angebrachten Markern, die sowohl in den Über- als auch in den Unterwasserpunktwolken zu sehen sind, ist deren Kombination dieser nicht möglich. Ein System, das in der Lage ist, 3D-Daten in beiden Medien gleichzeitig zu erfassen, würde diese Arbeit erheblich erleichtern und neue Einsatzmöglichkeiten schaffen.



**Abb. 1:** Prototyp des Unterwasserlinienlaserscanners an einem KUKA KR-16 Manipulatorarm befestigt, um die halb im Wasser liegende Szene zu scannen.

Da es in der Literatur nur wenige Arbeiten zum Erstellen von 3D-Scans von teilweise versunkenen Strukturen gibt, wurde im Rahmen dieses Beitrags ein Laser-Based Structured Light System (LbSLS), das ursprünglich für die Anwendung unter Wasser konstruiert wurde, dazu verwendet 3D-Informationen durch die Wasseroberfläche zu erstellen. Hierzu wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht mit einem über der Wasseroberfläche platzierten Structured Light (SL)-Laserscanner gleichzeitig Daten über und unter Wasser aufzuzeichnen. Dabei gilt es die, durch die Brechung an der Wasseroberfläche entstehenden Fehler zu korrigieren. Dies wurde zunächst in einem einfachen Versuchsaufbau mit einem statischen System für eine einzelne Laserlinie getestet. Anschließend wurde in einem größeren Aufbau der Scanner bewegt und so eine komplexe Szene aufgezeichnet. In diesem Schritt wurde ebenfalls der Einfluss verschiedener Winkel zwischen dem Scanner und der Wasseroberfläche betrachtet. Daraufhin wurde der so entstandene Datensatz mit der hier entwickelten Methode korrigiert und die Fehler vor und nach der Korrektur untersucht.

Im Laufe der Entwicklung stellte sich heraus, dass durch unterschiedliche Belichtungen der Kamera während der Aufnahme für die Detektierung der Wasseroberfläche keine externen Markierungen benötigt werden und diese aus den so entstanden Aufnahmen extrahiert werden kann. In den Experimenten konnte der Einfluss des Winkels zwischen dem Scanner und der Wasseroberfläche anschaulich dargelegt werden, ebenso wie die Korrektheit der entwickelten Methode zur Korrektur. Sie wurde sowohl in den Rekonstruktionen, als auch in der Fehleranalyse sichtbar.

## 2 State of the Art

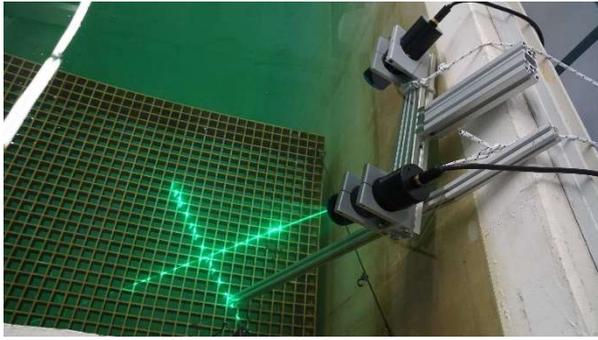
Verschiedene Wissenschaftler befassten sich bereits mit der Problematik des Scannens durch die Wasseroberfläche hindurch. Bei diesen kamen bereits verschiedene Methoden, von Structured-Light über Time of Flight (ToF) und Stereo Vision zum Einsatz. Häufige Anwendungen hierfür sind das Scannen aus Flugzeugen und Hubschraubern um Küstenlinien und Flüsse

((Hilldale and Raff, 2008; Wang and Philpot, 2007; Irish and Lillycrop, 1999; Westaway et al., 2003; Saylam et al., 2017) oder versunkene Ausgrabungsstätten (Doneus et al., 2013) zu vermessen.

Narasimhan und Nayar (2015) untersuchten die Anwendung von Structured Light für die 3D-Rekonstruktion durch eine Wasseroberfläche. Mithilfe eines Beamers projizierten sie ein Muster in ein, mit Wasser gefülltes Aquarium auf ein Test-Objekt und filmten dies mit einer Kamera. Entgegen der Verwendung von ToF, der Pfad des Lichtstrahls von der Lichtquelle zum Sensor nicht der gleiche, sondern es werden hier zwei unterschiedliche Wege verwendet. Dadurch wird es notwendig, den Winkel und Abstand von Kamera und Projektor zur Wasseroberfläche zu kennen und beide Brechungen in die Rekonstruktion mit einzubeziehen. Um das System möglichst präzise zur Oberfläche des Wassers und somit auch die beiden unterschiedlichen Brechungen zu kalibrieren, verwenden die Autoren zwei Ebenen an einer bekannten Position. Mit diesem Verfahren erzielten sie im Schnitt einen RMS - Fehler von 2,1%. Um den Einfluss der Trübheit des Wassers auf die Rekonstruktion zu beobachten, wurde das Wasser schrittweise mit Milch versetzt. Dabei war zu beobachten, dass mit erhöhter Verschmutzung des Wassers auch der Fehler zunimmt.

Klopfer et al. (2015) beschäftigten sich ebenfalls mit einem Structured Light Sensor, um mit diesem durch die Wasseroberfläche 3D-Daten zu rekonstruieren. Hierfür kam eine Microsoft Kinect zum Einsatz. In ihrem Aufbau befindet sich die Kinect zwischen 30 cm und 60 cm über der Wasseroberfläche, was das Scannen in bis zu 40 cm tiefes Wasser ermöglicht. Anschließend wurde die durch die Kinect bestimmte Punktwolke, basierend auf der Brechung der Lichtstrahlen an der Wasseroberfläche, korrigiert. Mit dieser Methode erreichten sie für eine Wassertiefe von bis zu 20 cm - entsprechend einer Gesamtentfernung von ca. 60 cm - einen Root-Mean-Square (RMS) Fehler von 3 mm. Damit befinden sie sich im gleichen Genauigkeitsbereich, der auf diese Entfernung mit der Kinect auch über Wasser erreicht werden kann.

Palomer et al. (2017) beschäftigen sich zwar nicht mit dem Scannen durch die Wasseroberfläche, jedoch treten bei ihrem Unterwasserlaserscanner, auf Grund der Bauart, ähnliche Probleme auf. Da bei einem Structured Light Laser System, das eine Linie in die Umgebung projiziert, die Lichtstrahlen nicht parallel auf die Wasseroberfläche treffen, verändert sich für jeden Lichtstrahl der Brechungswinkel und die projizierte Linie wird dadurch gebeugt. Da bei dem Unterwasserlinienlaserscanner von Palomer et al. (2017) der Laser durch eine flache Glasscheibe vom Wasser abgetrennt wird und er hinter dieser gedreht wird, lässt sich dies mit einem Linienlaserscanner vergleichen, der durch die Wasseroberfläche projiziert und dort gedreht wird. Damit strahlt der Laser nicht immer senkrecht auf die Wasseroberfläche. Da bei einem Linienlaser, aufgrund der geringen Distanz zur Wasseroberfläche, die Lichtstrahlen nicht parallel auf die Oberfläche treffen, sondern jeder Strahl einen anderen Einfallswinkel hat, variiert auch der Ausfallwinkel der Strahlen innerhalb der Linie, wenn diese nicht exakt senkrecht auf die Wasseroberfläche trifft. Palomer et al. (2017) untersuchten diesen Effekt auf eine Linie ausgiebig in ihrer Arbeit für unterschiedliche Einfallswinkel. Hierbei stellte sich heraus, dass sich die Form der Linie besonders gut durch einen elliptischen Kegel beschreiben lässt.



**Abb. 2:** Prototyp des Unterwasserlinienlaserscanners, der ein Kreuz in einen Wassertank projiziert.

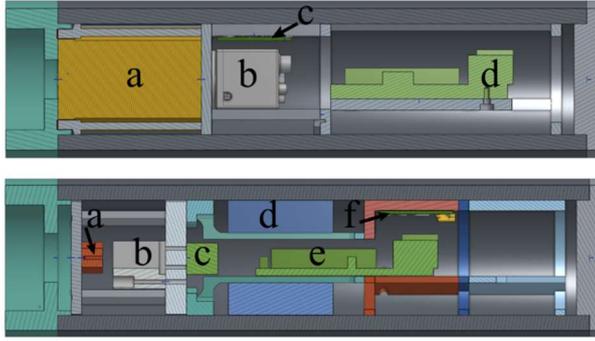
### 3 Methodik

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein triangulationsbasierter Linienlaserscanner gebaut und anschließend dazu verwendet, um präzise 3D-Punktwolken von halb versenkten Strukturen anzufertigen. Hierzu wird zunächst ein 3D-Scan der Szene ohne Korrektur der Brechung an der Wasseroberfläche erstellt. Da der Scanner auf einem Linienlaser basiert, erstellt er zunächst nur ein Profil der Szene an einer bestimmten Stelle. Für einen vollständigen Scan ist es notwendig, ihn über die Szene zu bewegen. Die hierzu benötigte 6-DOF Bewegung des Scanners wird hierbei durch ein externes Trackingsystem aufgezeichnet. Anschließend wird die Wasseroberfläche aus den Sensordaten bestimmt und alle unterhalb der Wasseroberfläche liegenden Punkte durch eine Rekonstruktion der Brechung der Lichtstrahlen an der Wasseroberfläche rekonstruiert. In diesem Abschnitt wird zunächst der Aufbau des Scanners und dessen Kalibrierung beschrieben. Anschließend wird auf Rekonstruktion Korrektur der Brechung eingegangen und die entwickelte Methode dargelegt.

#### 3.1 Unterwasserlaserscanner

Der Unterwasserlaserscanner besteht aus zwei wasserdichten Gehäusen, von denen das eine Gehäuse die Kamera und das andere den Laserprojektor enthält. Beide Gehäuse sind mit einer Inertial Measurement Unit (IMU) und einem kleinen Computer mit Netzwerkinterface ausgestattet. Die beiden Gehäuse sind auf einer 50cm langen Aluminiumstange befestigt. Das Lasergehäuse ist senkrecht und das Kameragehäuse in einem Winkel von  $30^\circ$  relativ zur Halterung ausgerichtet. Abbildung 2 zeigt das System während eines Tests. Für die nachfolgenden Experimente dieser Arbeit wurde nur eine Laserlinie des Kreuzprojektors verwendet.

In Abbildung 3 ist oben ein Querschnitt des CAD-Modells des Kameragehäuses abgebildet. Links beginnend markiert (a) das verwendete Objektiv mit einer Brennweite von 12,5 mm und (a) eine FLIR Blackfly 2.3 MP Color USB3 Vision (Sony Pregius IMX249) mit einer Sensorgröße von  $1/1,2''$  und einer Auflösung von  $1920 \times 1200$  Pixel bei 41 Bildern pro Sekunde. Mittig über der Kamera befindet sich (c) die IMU.



**Abb. 3:** Querschnitt der CAD Modelle: das obere Bild zeigt das Kameragehäuse und das untere das Gehäuse des Kreuzlinienlaserprojektors.

Die untere Grafik in Abbildung 3 zeigt einen Querschnitt durch das CAD-Modell des Lasergehäuses. Das Gehäuse beinhaltet zwei Linienoptiken (a), je eine pro verbauter Laserdiode (c). Bei den verwendeten Laserdioden handelt es sich um zwei grüne Laserdioden mit je 1 W und einer Wellenlänge von 525 nm. Um die Qualität der Linien zu verbessern, wurde zwischen den Dioden und den Linienoptiken je zwei Strahlenkorrekturprismen (b) eingebaut. Die Laser werden über den verbauten Raspberry Pi 3 (e) gesteuert. Das Lasergehäuse verfügt ebenfalls über eine IMU, die an der Stelle (f) in der Abbildung 4.3 zu erkennen ist.

### 3.2 Kalibrierung

Die Schätzung der Kameraparameter geschieht auf Basis des Lochkameramodells mit Verzerrung. Dabei berechnet sich die Projektion des Punktes  $X = (X, Y, Z)^T$  von Weltkoordinaten auf die Bildebene mittels

$$(X, Y, Z)^T \mapsto \left( f_x \frac{X}{Z} + p_x, f_y \frac{Y}{Z} + p_y \right)^T = (x, y)^T$$

wobei  $x = (x, y)^T$  die Bildkoordinaten der Projektion darstellen,  $p = (p_x, p_y)^T$  Bildmittelpunkt und  $f_x, f_y$  die Brennweite darstellen. In die normalisierte Projektion des Lochkameramodells

$$x_n = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X/Z \\ Y/Z \end{pmatrix}$$

wird die tangentielle und radiale Verzerrung wie folgt eingefügt:

$$\tilde{x} = x_n (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_5 r^6) + \begin{bmatrix} 2k_3 x_n y_n + k_4 (r^2 + 2x_n^2) \\ k_3 (r^2 + 2y_n^2) + 2k_4 x_n y_n \end{bmatrix}$$

wobei  $(k_1, k_2, k_5)$  die radialen und  $(k_3, k_4)$  die tangentialen Verzerrungsparameter darstellen. Im Folgenden stellt  $\tilde{x} = (\tilde{x}, \tilde{y})$  die realen, verzerrten und normalisierten Punktkoordinaten dar, wobei  $r^2 = x_n^2 + y_n^2$  gilt.



**Abb. 4:** Kalibrierung der Laserebene unter Verwendung einer L-förmigen 3D-Struktur.

Die Kalibrierung der Kamera wird nach der Methode von Zhang (Zhang, 2000) mit einer 3D-Struktur durchgeführt, welche AprilTags (Olson, 2011) als Referenzpunkte enthält. Dies ermöglicht eine automatische und zuverlässige Detektion der Punkte, auch wenn die Struktur nicht vollständig im Bild erfasst wurde. Nachdem die erkannten Punkte der Laserlinie im Bild extrahiert wurden, wird die Verzerrung bei diesen korrigiert. Daher müssen die Verzerrungsparameter während des 3D-Rekonstruktionsschritts nicht berücksichtigt werden, was zu einer Vereinfachung der Gleichungen in den folgenden Abschnitten führt.

Für die Kalibrierung des Laserprojektors ist es notwendig, die Laserebenenparameter relativ zum Ursprung der Kamera zu bestimmen. Hierzu wird eine L-förmige 3D-Struktur, die in der Abbildung 4 zu sehen ist, verwendet. Diese besteht aus zwei mit AprilTags versehenen, Ebenen. Daher ist es möglich, die Parameter der Laserebene aus einem einzelnen Bild zu bestimmen.

Im ersten Schritt wird die L-förmige Struktur im Kamerabild detektiert und deren relative Position zur Kamera bestimmt. Anschließend werden die Ebenenparameter der beiden Flächen der Struktur bestimmt und die auf ihnen liegenden Punkte der Laserlinie extrahiert. Die 3D-Koordinaten der Punkte der Laserlinie können durch Schneiden der Geraden durch das Kamerazentrum und den erkannten Punkten auf der Bildebene mit der Ebene der 3D-Struktur bestimmt werden. Die Laserebene wird anschließend, unter Verwendung mehrerer Kalibrierungsbilder und eines RANSAC, in die rekonstruierten 3D-Punkte der Laserlinie gelegt.

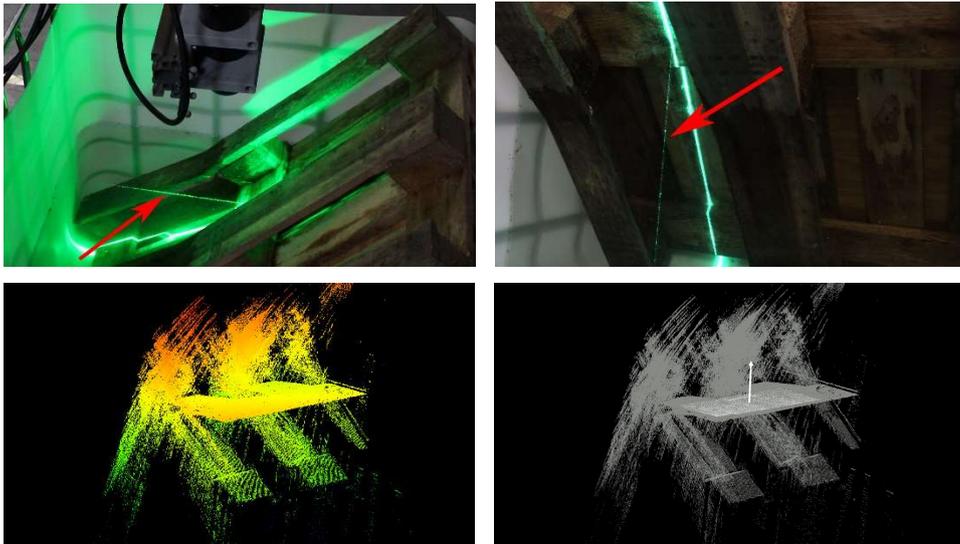
### 3.3 3D Rekonstruktion

Nachdem das System kalibriert wurde und sowohl das Kameramodell, als auch die Parameter der Laserebene bekannt sind, wird für die 3D-Rekonstruktion das Lichtschnittverfahren zwischen Kamera und Laserebene verwendet. Die Laserebene  $\pi_i$  wird dabei beschrieben durch

$$\pi_i: a_i X + b_i Y + c_i Z = 1$$

wobei  $(a_i, b_i, c_i)$  die Ebenenparameter und  $\mathbf{X} = (X, Y, Z)^T$  einen Punkt in Weltkoordinaten darstellt. Unter Verwendung des perspektivischen Kameramodells, das zuvor beschrieben wurde, lässt sich die Ebenengleichung wie folgt darstellen

$$\pi_i: a_i \frac{x - p_x}{f_x} + b_i \frac{y - p_y}{f_y} + c_i = \frac{1}{Z}$$



**Abb. 5:** Die Spiegelung der Laserlinie auf der Wasseroberfläche kann dazu benutzt werden, die Wasserebene zu bestimmen.

dabei sind  $\mathbf{x} = (x, y)^T$  die Bildkoordinaten von  $\mathbf{X}$  auf der Bildebene,  $\mathbf{p} = (p_x, p_y)$  der Bildmittelpunkt und  $f_x, f_y$  die Brennweite.

Die Koordinaten eines 3D Objektpunktes  $\mathbf{X} = (X, Y, Z)^T$  lassen sich aus den Koordinaten eines Punktes  $\mathbf{x} = (x, y)^T$  auf der Bildebene durch Schneiden des Kamerastrahls mit der Laserebene berechnen:

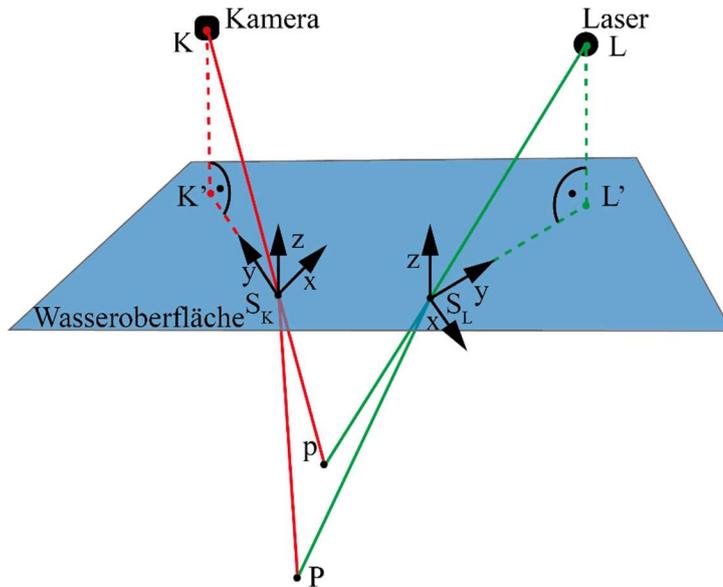
$$Z = \frac{1}{a_i \frac{x-p_x}{f_x} + b_i \frac{y-p_y}{f_y} + c_i}$$

$$X = Z \frac{x-p_x}{f_x}$$

$$Y = Z \frac{y-p_y}{f_y}$$

### 3.4 Bestimmung der Wasseroberfläche

In dieser Arbeit wurde die Wasserfläche zunächst als glatte Ebene angenommen, die automatisch erkannt und aus den Laserpunkten bestimmt werden kann. In Abbildung 5 ist die Reflexion der Laserlinie an der Wasseroberfläche zu sehen. Wird der Schwellwert des Liniendetektors entsprechend gewählt, kann diese Reflexion erkannt und anschließend rekonstruiert werden. Die so entstandene Punktcloud ist in der unteren linken Grafik der Abbildung 5 zu sehen. Die Wasserebene ist hierbei deutlich zu erkennen. Anschließend können aus diesen Punkten die Ebenenparameter bestimmt werden. Das untere rechte Bild der Abbildung 5 zeigt die berechnete Ebene und deren Normale in Weiß und die Punkte des 3D-



**Abb. 6:** Das Prinzip der strahlenbasierten Korrektur der Brechung an der Wasseroberfläche. Der Punkt  $p$  ist der zuerst, mittels Lichtschnittverfahren, ohne Beachtung der Brechung rekonstruierte Punkt.  $P$  beschreibt den korrigierten Punkt.  $K$  ist das Kamera- und  $L$  das Laserprojektionszentrum.  $K'$  und  $L'$  sind die Projektionen des Kamera- und Laserzentrums auf die Wasserebene entlang deren Normale.  $S_K$  und  $S_L$  beschreiben die Schnittpunkte des Kamera- und Laserstrahls mit der Wasseroberfläche.

Scans in Grau. Die so bestimmten Parameter werden im späteren Verlauf gegen die mit dem Trackingsystem bestimmte Wasserebene validiert und zur Korrektur der Daten verwendet.

### 3.5 Brechungskorrektur

Um korrekte Scans von halb versenkten Strukturen anfertigen zu können, ist es notwendig, die Lichtbrechung an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser zu korrigieren. Nachdem die 3D-Rekonstruktion mithilfe des in Abschnitt 3.3 beschriebenen Lichtschnittverfahrens und der 6DOF Trajektorie des Scanners durchgeführt wurde, wird die Punktwolke in über- und unterhalb der Wasseroberfläche liegende Punkte aufgeteilt. Im Folgenden werden die unterhalb der Wasserebene liegenden Punkte mit einem an Klopfer et al. (2017) angelehnten Verfahren korrigiert. Da der Kamera- und Laserstrahl nicht dem gleichen optischen Pfad folgen, ist es notwendig, die Brechung für beide getrennt zu betrachten.

Das zugrundeliegende Prinzip der strahlenbasierten Korrektur ist in der Abbildung 6 zu sehen. Unter Verwendung der 6DOF Trajektorie des Scanners und der nach Abschnitt 3.4 bestimmten Wasserebene, ist für jede Scanlinie das Kamerazentrum  $K$ , die Position des Laserprojektionszentrums  $L$  und die Wasserebene im gleichen Koordinatensystem bekannt. Für

jeden unterhalb der Wasseroberfläche liegenden Punkt  $p$ , kann mit der strahlenbasierten Korrektur nun der korrekte Punkt  $P$  bestimmt werden.

Zunächst werden jeweils die Schnittpunkte des Kamera- und Laserstrahls mit der Wasseroberfläche berechnet. Der Punkt  $S_K$  ist der Schnittpunkt zwischen der Geraden vom Kamerazentrum  $K$  zum Punkt  $p$  mit der Wasseroberfläche, in der Abbildung 6 in rot gekennzeichnet.  $S_L$  ist der Schnittpunkt der Geraden vom Laserzentrum  $L$  durch den Punkt  $p$ , in der Grafik 6 in grün dargestellt, mit der Wasseroberfläche.

An den Punkten  $S_K$  und  $S_L$  müssen im nächsten Schritt die Brechungswinkel bestimmt werden. Der Einfallswinkel eines Strahls  $\mathbf{r}$  ist

$$\delta_1 = \cos^{-1} \left( \frac{\mathbf{n}_W \cdot \mathbf{r}}{\|\mathbf{n}_W\| \|\mathbf{r}\|} \right)$$

wobei  $\mathbf{n}_W$  die Normale der Wasseroberfläche ist. Für den Brechungswinkel  $\delta_2$ , berechnet nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz, ergibt sich

$$\delta_2 = \cos^{-1} \left( \frac{n_1 \sin \delta_1}{n_2} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{n_1 \cdot \mathbf{n}_W \cdot \mathbf{r}}{n_2 \cdot \|\mathbf{n}_W\| \|\mathbf{r}\|} \right)$$

wobei  $n_1$  und  $n_2$  die Brechungsindizes von Luft und Wasser sind.

Der gebrochene Strahl  $\mathbf{r}'$  wird nun durch eine Drehung um die Winkeldifferenz  $\Delta_\delta = \delta_2 - \delta_1$  berechnet. Da das Snelliussche Brechungsgesetz davon ausgeht, dass sich der eintreffende und der gebrochene Strahl in der gleichen Ebene befinden, muss zunächst eine geeignete Transformation gefunden werden. Hierzu wird eine orthonormale Basis  $B$  gebildet, deren  $z$ -Achse in Richtung der Normalen der Wasserebene zeigt, die  $y$ -Achse zeigt in Richtung der Projektion des Kamerazentrums  $K'$  beziehungsweise des Laserzentrums  $L'$  auf die Wasseroberfläche. Der gebrochene Strahl  $\mathbf{r}'$  kann somit als Drehung um die  $x$ -Achse der Basis  $B$  mit dem Winkel  $\Delta_\delta$  beschrieben werden:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} T_B^{A^{-1}} R_{\Delta_\delta} T_B^A$$

Hierbei ist  $R_{\Delta_\delta}$  die Rotationsmatrix um den Winkel  $\Delta_\delta = \delta_2 - \delta_1$  um die  $x$ -Achse ist und  $T_B^A$  eine Transformationsmatrix für den Basiswechsel von der ursprünglichen Basis  $A$  in die neu bestimmte Basis  $B$  ist.

Nachdem dies sowohl für den Kamerastrahl, als auch für den Laserstrahl berechnet wurde, ist der korrigierte Punkt  $P$  der Schnittpunkt der beiden gebrochenen Geraden. Im Laufe der Versuche stellte sich jedoch heraus, dass diese Lösung sehr anfällig für kleine Winkelfehler der gebrochenen Strahlen ist, aus denen größere Fehler in der Berechnung des Punktes  $P$  resultieren. Auch kleinere Fehler in der Kalibrierung des Laserzentrums bezüglich der Kamera haben eine Auswirkung auf den berechneten Laserstrahl. Um diesen Fehler zu minimieren, wurde der Punkt  $P$  nicht als Schnittpunkt zweier Geraden berechnet, stattdessen wurde aus dem gebrochenen Laserstrahl und der Wasserebene eine neue Laserebene aufgespannt, die anschließend mit dem gebrochenen Kamerastrahl geschnitten wurde.



**Abb. 7:** Links: Aufzeichnung einer halb im Wasser versunkenen Szene mit dem an einem Manipulator befestigten Scanner. Rechts: Detailansicht der aufgezeichneten Szene mit der Laserlinie des Scanners im Bild.

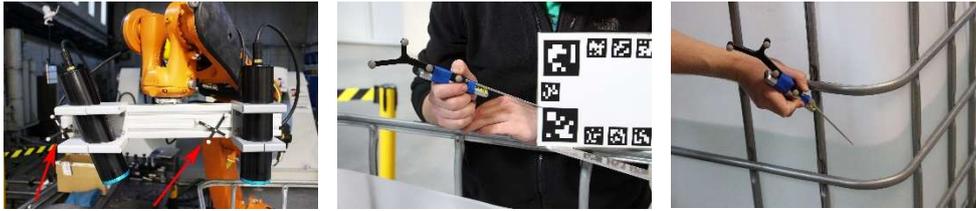
## 4 Experimente

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuche diskutiert. Zunächst wird eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht die Wasseroberfläche ohne zusätzliche Hilfsmittel zu erkennen und anschließend mit den Ergebnissen des Trackingsystems verglichen. Daraufhin wird die zuvor vorgestellte Methode angewendet, um einen vollständigen 3D-Scan der Szene zu korrigieren. Hierbei werden auch unterschiedliche Einstrahlwinkel betrachtet. Dabei wird der Fehler vor und nach der Korrektur betrachtet und für eine Bewertung der Methode herangezogen.

### 4.1 Experimentaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 7 zu sehen. Es wurden drei verschiedene Szenen in einem zur Hälfte mit Wasser gefüllten Tank mit der Kantenlänge von 1m platziert. Die erste Szene besteht aus einer Euro-Palette aus Holz, zu sehen in Abbildung 1. Die zweite Szene besteht aus einem Gartenzwerg, einer Kaffeetasse, zwei Schachbrettern und einem Rohr, zu sehen in Abbildung 7. Die dritte Szene besteht lediglich aus dem an der Wand des Tanks hängenden Schachbrett aus der zweiten Szene.

Um den verwendeten Laserlinienscanner kontrolliert und wiederholbar zu bewegen, wurde er an einem KUKA KR-16 Manipulatorarm befestigt. Der somit abgefahrene Pfad und die Position der Wasseroberfläche wurden mit einem OptiTrack:V120Trio Trackingsystem gemessen. Hierzu wurden an dem Scanner zwei Marker befestigt, die eine hochpräzise Messung der Positionen bezüglich des Trackingsystems ermöglichen. Die beiden angebrachten Marker sind im linken Bild der Abbildung 8 zu erkennen. Die Wasseroberfläche wurde mit einer Messspitze des Trackingsystems an vier Punkten angetastet und daraus die Ebenengleichung bestimmt. Dies ist in dem rechten Bild von Abbildung 8 zu erkennen. Um die benötigte Transformation zwischen dem Koordinatensystem des Trackers und der Kamera zu bestimmen, wurde, wie im mittleren Bild der Abbildung 8 zu sehen, die Ecken einiger Tags angetastet, die gleichzeitig in der Kamera zu sehen waren. Somit ist es möglich, eine



**Abb. 8:** Links: Zwei Marker zum Aufzeichnen der Trajektorie wurden am Scanner befestigt. Mitte: Messung der Referenzpunkte für die Kalibrierung zwischen Trackingsystem und Kamera. Rechts: Einmessen der Wasseroberfläche als Referenz für die aus dem Scan bestimmten Parameter.

Transformation zwischen den angetasteten Punkten auf den Tags und den Koordinaten der Tags im Kamerakoordinatensystem zu bestimmen. Dies wird benötigt, um sowohl die Wasseroberfläche in Kamerakoordinaten zu transformieren, als auch um die Transformation zwischen den einzelnen Linienscans zu kennen, um diese zu einem vollständigen 3D-Scan zusammenzufügen.

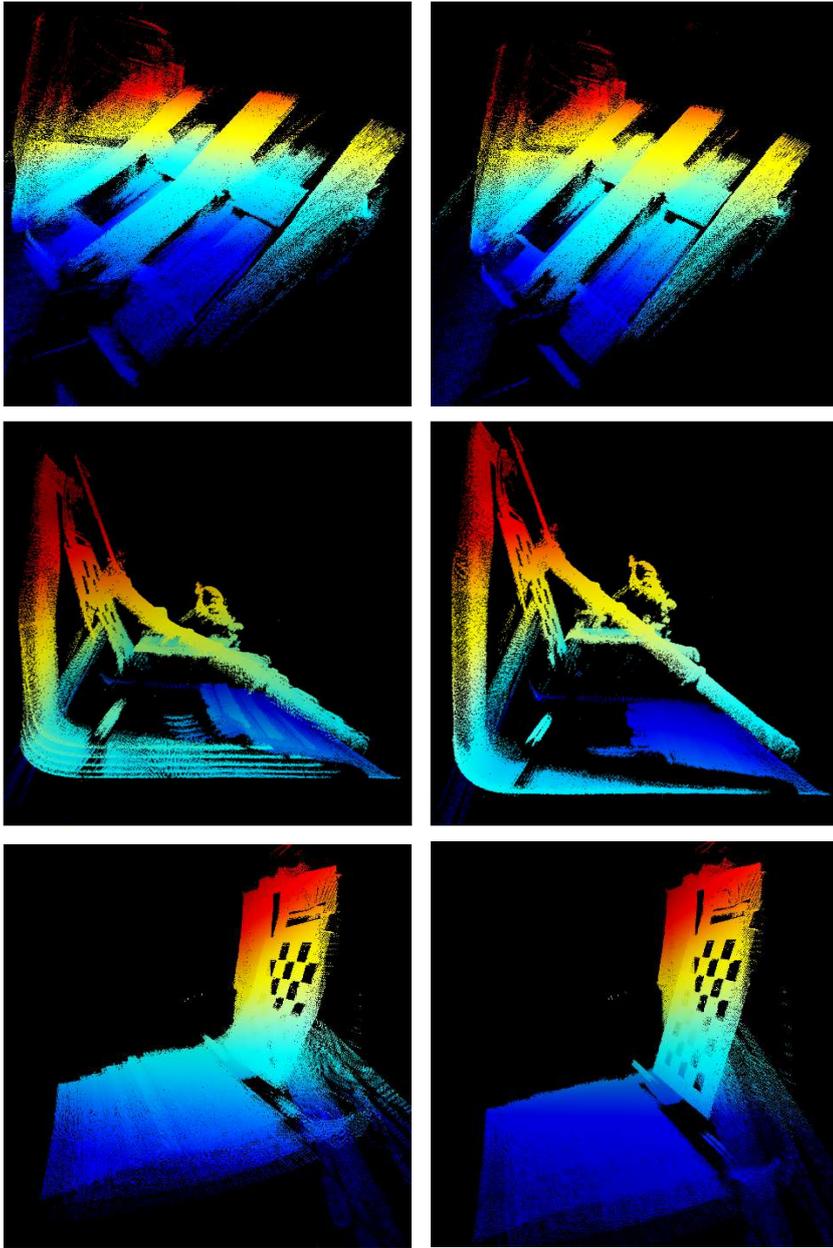
#### 4.2 Verifikation der erkannten Wasseroberfläche

Wie bereits im Abschnitt 3.4 beschrieben, wurde die Wasseroberfläche aus den aufgezeichneten Daten bestimmt. Um diese Parameter zu validieren, wurde mit dem OptiTrack Trackingsystem die Wasseroberfläche händisch an mehreren Punkten angetastet und daraus eine Ebene als Referenz bestimmt. Der Winkel zwischen den Normalenvektoren dieser beiden Ebenen beträgt dabei lediglich  $0,21^\circ$ . Weiter wurde, durch Verwendung der Hesseschen Normalform, der Abstand der beiden Ebenen zum Ursprung bestimmt. Der daraus resultierende Abstand der beiden Ebenen zueinander beträgt 1cm.

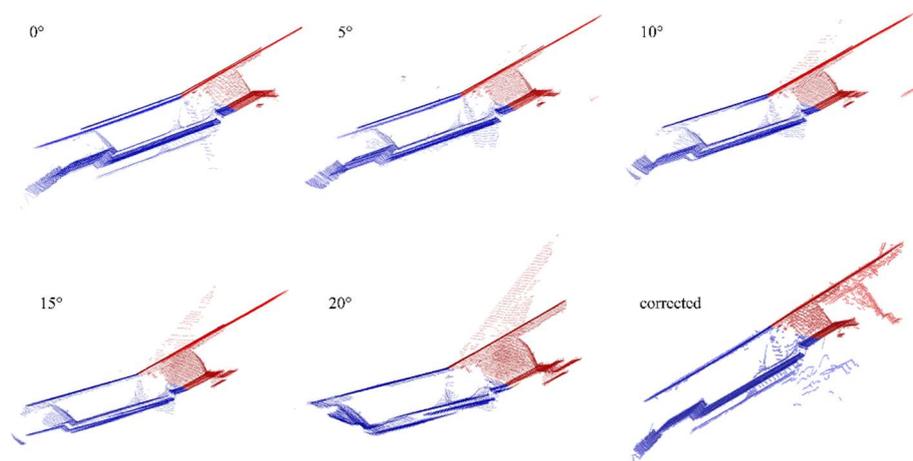
Der sehr kleine Winkelfehler von  $0,21^\circ$  zusammen mit dem geringen Abstand von 1 cm der Ebenen zueinander lässt sich durch einen minimalen Kalibrierfehler zwischen der Kamera des Scanners und dem externen Trackingsystem erklären. Da in dem Kalibrierprozess mehrere händische Messungen und eine Reihe von Transformationen durchgeführt werden müssen, ist von kleineren Fehlern auszugehen. Werden solche Fehler berücksichtigt, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Wasseroberfläche auch aus den Aufnahmen des SL-Scanners bestimmen lassen.

#### 4.3 Ergebnisse der 3D Scans

Die 3D-Punktwolken aus den Scans der drei unterschiedlichen Szenen sind in Abbildung 9 zu sehen, die linke Seite zeigt dabei die nicht korrigierten und die rechte Seite die korrigierten Daten. Jeder Scan einer Szene besteht dabei aus ca. 800 einzelnen Linien, die anhand der Bewegungsdaten aus dem Trackingsystem zusammengefügt wurden. Die im Folgenden gezeigten Bilder des 3D-Scans wurden mit der Software 3DTK [1] erstellt. Es wurden dabei zwei Methoden zur farblichen Kennzeichnung der Punkte gewählt, die erste ist eine Einfärbung nach Höhe, von Blau nach Rot. Die zweite Einfärbung unterscheidet zwischen den über dem Wasser gelegenen Punkten in Rot und den unter der Wasseroberfläche liegenden Punkten in Blau.



**Abb. 9:** Punktwolken der nicht korrigierten Daten auf der linken Seite und der Korrekturen auf der rechten Seite. Die Punktwolken sind nach Höhe farblich eingefärbt. Der Fehler durch die Brechung an der Wasseroberfläche ist in den linken Abbildungen deutlich zu erkennen, beispielsweise am Boden der mittleren Szene, der sich vor der Korrektur deutlich in mehrere Schichten aufteilt. Rechts wurde dies korrigiert.



**Abb. 10:** Querschnitt durch den 3D-Scan einer Holzpalette. Die Punkte unterhalb der Wasseroberfläche sind hierbei in blau, die oberhalb in rot eingefärbt. Beginnend oben links mit  $0^\circ$  wurde der Scanner hierbei immer weitergedreht, um verschiedene Einfallswinkel zu betrachten. Das letzte Bild zeigt den Scan nach der Korrektur. Die Bretter der Palette bilden hierbei wieder eine Ebene.

Da die Verwendung eines KUKA Manipulators es ermöglicht, den Scanner in einem vorher festgelegten Winkel konstant über die gesamte Szene zu bewegen, wurde zuerst der Einfluss unterschiedlicher Einfallswinkel betrachtet. Die erste Aufnahme geschah mit einem senkrecht zur Wasseroberfläche ausgerichteten Scanner, anschließend wurde der Winkel in  $5^\circ$  Schritten bis auf  $20^\circ$  erhöht. Die aus diesen Scans resultierenden Daten sind in Abbildung 10 zu sehen. Sie zeigt einen Querschnitt durch die Palette. Beginnend oben links finden sich die Aufnahmen für  $5^\circ$ , rechts davon  $10^\circ$ , bis hin zu unten links  $20^\circ$  und unten rechts die Aufnahmen nach der Korrektur. Die Steigerung der Brechung und damit verbundene Stauchung des Scans wird dabei besonders gut erkennbar. Ebenfalls ist der Erfolg der Korrektur im letzten Bild deutlich sichtbar. Während der Winkel zwischen der über und unter dem Wasser liegenden Linien in den vorherigen Abbildungen immer größer wird, liegen die beiden Linien nach der Korrektur wieder in einer Ebene.

Nachdem die Funktionsfähigkeit der hier erklärten Methode zur Korrektur der Lichtbrechung an der Wasseroberfläche in 3D-Scans nun durch die Anwendung auf einem Datensatz visuell gezeigt wurde, werden im Folgenden nochmals die Scans der Szene mit dem Schachbrett verwendet, um Fehlermessungen durchzuführen. Da davon ausgegangen werden kann, dass die gesamte Fläche des Schachbretts, ober- und unterhalb der Wasseroberfläche, eine Ebene bildet, wird dies nun als Referenz betrachtet. Zunächst wird für jeden Winkelschritt eine Ebene in die über- und unterhalb der Wasseroberfläche liegenden Punkte des Schachbretts gelegt. Anschließend wird der Winkel zwischen diesen beiden Ebenen berechnet und die Veränderung dieses Winkels über die verschiedenen Aufnahmen betrachtet. Zuletzt wird diese Berechnung auch auf den korrigierten Scan angewendet.

**Tabelle 1:** Winkelfehler zwischen den Normalen einer Ebene über und unter Wasser für die unkorrigierten Daten. Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) der gefitteten Ebene.

Scanner Winkel	Winkelfehler	RMSE ü. W.	RMSE u. W.
0°	5,56°	0,14 cm	0,14 cm
5°	6,65°	0,14 cm	0,13 cm
10°	8,12°	0,13 cm	0,14 cm
15°	10,76°	0,12 cm	0,15 cm
20°	14,53°	0,13 cm	0,17 cm

**Tabelle 2:** Winkelfehler zwischen den Normalen einer Ebene über und unter Wasser für die korrigierten Daten. Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) der gefitteten Ebene.

Scanner Winkel	Winkelfehler	RMSE ü. W.	RMSE u. W.
0°	0,19°	0,14 cm	0,14 cm
5°	0,34°	0,14 cm	0,13 cm
10°	0,37°	0,13 cm	0,14 cm
15°	0,35°	0,13 cm	0,16 cm
20°	0,53°	0,13 cm	0,17 cm

In den jeweils über und unter Wasser liegenden Teil wurde mit CloudCompare eine Ebene gelegt und anschließend der Winkel zwischen diesen berechnet. Dies wird in Tabelle 1 aufgelistet. Neben den Winkelfehlern für jeden Scan ist hier auch der RMS-Fehler in cm, zwischen den Punkten des 3D-Scans und der bestimmten Ebenen zu sehen. Beginnend mit dem Scan, bei dem der Scanner senkrecht zur Wasseroberfläche ausgerichtet war, zeigt sich hier ein Winkelfehler von 5,56°. Wie sich auch bereits in diesen Abbildungen zeigte, ist auch der Tabelle zu entnehmen, dass der Winkelfehler mit steigendem Einfallswinkel stetig wächst. Liegen die Werte für die senkrechte Aufnahme und den ersten 5° mit 5,56° und 6,65° noch nahe beieinander, so sind es bei einem Einstrahlwinkel von 10° bereits 8,12° Unterschied zwischen den beiden Ebenen. Für den nächsten Winkelschritt, bei dem der Scanner eine Ausrichtung von 15° hat, steigt der Fehler weiter auf 10,76° an. Der größte Fehler, wie auch schon in den Abbildungen zu sehen, wird bei einem Einstrahlwinkel von 20° erreicht. An dieser Stelle beträgt der Fehler 14,53°. Der RMS-Fehler liegt bei allen Aufnahmen für über und unter Wasser zwischen 0,12cm und 0,14cm.

Diese Fehler konnten durch die Korrektur der Daten deutlich verringert werden. Die Ergebnisse der Korrektur werden in Tabelle 2 aufgelistet. Für die senkrechte Position des Scanners beträgt der Winkelfehler zwischen den Ebenen gerade noch 0,19°. Auch für die anderen Einstrahlwinkel konnte der Fehler sichtbar reduziert werden. Für 5° beträgt er 0,34°, bei 10° verbleibt ein Fehler von 0,37° und für 15° ein Fehler von 0,35°. Selbst für den größten Einfallswinkel von 20° konnte der Winkelfehler von 14,53° auf 0,53° korrigiert werden. Der RMS-Fehler aller Ebenen liegt hierbei stets zwischen 0,13cm und 0,17cm. Der minimal höhere Fehler für die unterhalb der Wasseroberfläche liegende Ebene wird sicherlich auch durch einige Ungenauigkeiten in der Kalibrierung des Systems verursacht. Hierbei können

sowohl kleinere Fehler in der Positionsbestimmung der Wasseroberfläche eine Rolle spielen, als auch die Position des Laserzentrums zur Kamera, die nur grob geschätzt wurde. Dennoch zeigen sowohl die vorherigen Abbildungen, als auch die Reduzierung des Winkelfehlers zwischen den beiden Ebenen, dass die Methode korrekt funktioniert. Der durch die Brechung verursachte Fehler konnte fast vollständig korrigiert werden.

## 5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht, korrekte 3D-Scans von halbversunkenen Strukturen mit Hilfe eines triangulationsbasierten 3D Laserscanners anzufertigen. Hierzu wurde ein geometrisches Modell der Brechung für den verwendeten Linienlaserscanner gezeigt und eine Methode zur Korrektur der durch die Brechung entstandenen Fehler in der Punktwolke erläutert. In einem Versuchsaufbau mit Hilfe eines industriellen Manipulators konnte gezeigt werden, dass die Brechung an der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft vollständig erfasst und korrigiert werden kann und es somit möglich ist, korrekte 3D-Scans von halbversunkenen Strukturen anzufertigen. Weiter konnte gezeigt werden, dass dies ohne jegliche externen Marker möglich ist und die Wasseroberfläche direkt aus den aufgezeichneten Daten des Scanners bestimmt werden kann. In einer weiterführenden Arbeit ist es notwendig, die Genauigkeit mittels einiger Prüfkörper exakter zu untersuchen. Ebenfalls wurde für diese Arbeit eine flache Wasseroberfläche angenommen, da unter realen Bedingungen die Wasseroberfläche jedoch meist einen minimalen, Wellengang aufweist, gilt es dessen Einfluss dieser genauer zu untersuchen. Weiterführend sollen Daten in Feldversuchen aufgezeichnet und untersucht werden, mit dem Ziel die Methode auch für unruhiges Wasser weiterzuentwickeln. Ebenfalls soll hierbei der Effekt der Trübheit des Wassers auf die Genauigkeit der Scans untersucht werden.

## Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert aus dem Horizon2020 Projekt ;VAMOS! unter der Projekt-ID 642477.

## Literatur

- Fryer, J. & Kniest, H. (1985): *Errors in depth determination caused by waves in through-water photogrammetry*. The Photogrammetric Record 11(66), pp. 745–753.
- Hilldale, R. C. and Raff, D. (2008): *Assessing the ability of airborne lidar to map river bathymetry*. Earth Surface Processes and Landforms 33(5), pp. 773–783.
- Irish, J. L. and Lillycrop, W. J. (1999): *Scanning laser mapping of the coastal zone: The shoals system*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54(2), pp. 123–129.
- Klopfer, F., Hämmerle, M. and Höfle, B. (2017): *Assessing the potential of a low-cost 3-D sensor in shallow-water bathymetry*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.

- Maas, H.-G. (2015): *On the accuracy potential in underwater/multimedia photogrammetry*. Sensors 15(8), pp. 18140–18152.
- Menna, F., Nocerino, E., Troisi, S. and Remondino, F. (2013): *A photogrammetric approach to survey floating and semi-submerged objects*. SPIE Optical Metrology 8791, pp. 87910H–87910H.
- Menna, F., Nocerino, E., Troisi, S. and Remondino, F. (2015): *Joint alignment of underwater and above-the-water photogrammetric 3D models by independent models adjustment*. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 40(5), pp. 143.
- Narasimhan, S. G. and Nayar, S. K. (2005): *Structured light methods for underwater imaging: light stripe scanning and photometric stereo*. In: OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE, IEEE, pp. 2610–2617.
- Okamoto, A. (1982): *Wave influences in two-media photogrammetry*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 48, pp. 1487–1499.
- Olson, E. (2011): *Apritag: A robust and flexible visual fiducial system*. In: Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on, IEEE, pp. 3400–3407.
- Palomer, A., Ridao, P., Ribas, D. and Forest, J. (2017): *Underwater 3D laser scanners: The deformation of the plane*. In: Sensing and Control for Autonomous Vehicles, Springer, pp. 73–88.
- Sarafraz, A. and Haus, B. K. (2016): *A structured light method for underwater surface reconstruction*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 114, pp. 40–52.
- Saylam, K., Brown, R. A. and Hupp, J. R. (2017): *Assessment of depth and turbidity with airborne lidar bathymetry and multiband satellite imagery in shallow water bodies of the alaskan north slope*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 58, pp. 191–200.
- Wang, C.-K. and Philpot, W. D. (2007): *Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters*. Remote Sensing of Environment 106(1), pp. 123–135.
- Westaway, R., Lane, S. and Hicks, D. (2003): *Remote survey of large-scale braided, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis*. International Journal of Remote Sensing 24(4), pp. 795–815.

van der Lucht, Joschka  
Zentrum für Telematik e.V., Würzburg  
j.van-der-lucht@telematik-zentrum.de

Bleier, Michael  
Zentrum für Telematik e.V., Würzburg  
m.bleier@telematik-zentrum.de

Leutert, Florian  
Zentrum für Telematik e.V., Würzburg  
f.leutert@telematik-zentrum.de

Schilling, Klaus  
Zentrum für Telematik e.V., Würzburg  
Julius-Maximilian-Universität Würzburg, Informatik VII – Robotik und Telematik  
k.schilling@telematik-zentrum.de

Nüchter, Andreas  
Zentrum für Telematik e.V., Würzburg  
Julius-Maximilian-Universität Würzburg, Informatik VII – Robotik und Telematik  
andreas@nuechti.de