



LEHRSTUHL FÜR INFORMATIK VII
ROBOTIK UND TELEMATIK

Masterarbeit

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

Joschka van der Lucht

November 2017

Erstgutachter: Prof. Dr. Andreas Nüchter
Zweitgutachter: Prof. Dr. Klaus Schilling
Betreuer: Michael Bleier

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 getestet. Dabei bestand der Versuchsaufbau aus einem Wassertank mit zwei verschiedenen Szenen aus unterschiedlichen Objekten, die teilweise mit Wasser bedeckt waren. Der Scanner wurde dabei an einem KUKA KR-16 befestigt, da dies die Möglichkeit bietet den Scanner gleichmäßig, definiert und wiederholbar zu bewegen. Die Bewegungen des Scanners und auch die Lage der Wasseroberfläche 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 zur Wasseroberfläche bewegt. Begonnen wurde hierbei mit 0° , somit senkrecht, und dies in 5° Schritten bis zu auf einen Winkel von 20° erhöht. Untersucht wurde anschließend die Oberfläche eines Balkens, der die Wasseroberfläche durchdringt. An diesem wurde der, durch die Brechung an der Wasseroberfläche entstandene, Winkel zwischen den beiden Ebenen bestimmt. Vor der Korrektur betrug dieser Fehler zwischen $10,04^\circ$ für die senkrechte Position und $15,32^\circ$ für einen Einfallswinkel von 20° . Durch die in dieser Arbeit entwickelte Methode konnte der Datensatz erfolgreich korrigiert werden und der Fehler auf $1,11^\circ$ reduziert werden. Weiterhin stellte sich im Laufe der Experimente heraus, dass durch unterschiedliche Belichtungen der Kamerabilder die Wasseroberfläche mit einer sehr hohen Genauigkeit aus den aufgezeichneten Daten bestimmt werden kann. Dies macht ein externes Trackingsystem oder Markierungen zur Bestimmung der Lage der Wasseroberfläche überflüssig.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung und wissenschaftlicher Beitrag	3
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	State of the Art	5
2.1	3D-Rekonstruktion	5
2.1.1	Methoden	5
2.1.2	Sensorsysteme	7
2.2	3D-Erfassung durch die Wasseroberfläche	18
3	Theorie	27
3.1	Kamerakalibrierung	27
3.1.1	Ideales Lochkameramodell	27
3.1.2	Lochkameramodell mit radialer und tangentialer Verzeichnung	29
3.1.3	Kalibrierung	30
3.2	Linienerkennung	34
3.3	Snelliussches Brechungsgesetz	37
3.4	Laserkalibrierung	39
3.5	Rekonstruktion	41
3.5.1	Rekonstruktion durch Lichtschnittverfahren	41
3.5.2	Spezielles Brechungsmodell unter Wasser	42
4	Aufbau des Systems	45
4.1	Aufbau des 3D-Laserscanners	46
4.2	Konfiguration für die Anwendung unter Wasser	47
4.3	Versuchsaufbau für das Scannen durch die Wasseroberfläche	47
5	Versuche und Auswertung	51
5.1	Bestimmung der Wasserebene aus den 3D-Daten	51
5.2	Ergebnis mit statischem Scanner	53
5.3	Ergebnis mit bewegtem Scanner	57

6 Zusammenfassung und Ausblick	71
Abkürzungsverzeichnis	73
Literaturverzeichnis	75

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

In Europa wurden über die letzten Jahrhunderte die meisten, leicht zu erreichenden, Mineralvorkommen ausgeschöpft. Jedoch zeigen Schätzungen, dass es in Tiefen von 500-1000 Metern noch europäische Bodenschätze im Wert von circa 100 Milliarden Euro gibt [4]. Da sich diese jedoch meist in dicht besiedelten Gebieten, ehemaligen Bergwerken, als minderwertige Einlagerungen oder in kleineren Einlagen befinden, erweist sich größerer, konventioneller Bergbau hier als nicht rentabel. Aus diesem Grund müssen, um eine nachhaltige Versorgung mit Rohstoffen zu gewährleisten, neue Methoden entwickelt werden. ¡VAMOS! (Viable Alternative Mine Operating System) [8] ist ein Projekt, im Rahmen des Horizont 2020 Programms der Europäischen Union, das sich mit der Entwicklung und dem Bau eines Unterwasserbergbauroboters beschäftigt, der in vier europäischen Minen getestet wird. Das Vehikel bei dem ersten Feldtest in einer Imerys Minerals Mine in Lee Moor, England, zeigt Abbildung 1.1

Um dem Bediener ein möglichst intuitives Umfeld zu schaffen, soll ihm eine 3D-Karte des Untergrunds zur Verfügung gestellt werden. Hierfür ist es notwendig, das gesamte Arbeitsgebiet zuverlässig zu kartieren. Für die Gewinnung der 3D-Daten der Mine wird im Projekt ein Autonomous Underwater Vehicle (AUV) eingesetzt, das mittels eines Multibeam Sonar (MBS) das Gewässer scannt. Um die Umgebungskarte zu vervollständigen, werden auch über Wasser, mit einem Light Detection and Ranging (LiDAR), 3D-Daten aufgezeichnet und diese anschließend miteinander kombiniert. Abbildung 1.2 zeigt eine solche kombinierte 3D-Punktwolke, die Daten des LiDAR sind in RGB-Farben dargestellt und der Farbverlauf von Blau nach Rot in der Mitte, sind die, nach Höhe eingefärbten, Daten des Sonars. Auffällig hierbei ist der schwarze Streifen, der Bereich in dem keine Daten aufgezeichnet wurden, zwischen den beiden Datensätzen des LiDAR und des Sonargeräts. Dieser entsteht, da es mit einem herkömmlichen LiDAR nicht möglich ist, die Wasseroberfläche zu durchdringen und gleichzeitig das Sonar eine gewisse Mindestwassertiefe benötigt. Um nun diesen Bereich mit Daten füllen zu können, wird ein Scanner benötigt, der dazu in der Lage ist, in beiden Medien, sowohl im Wasser als auch in Luft, gleichzeitig Daten aufzuzeichnen.



Abbildung 1.1: ¡VAMOS! Unterwasserbergbausystem bei dem ersten Feldtest in Lee Moor, England.

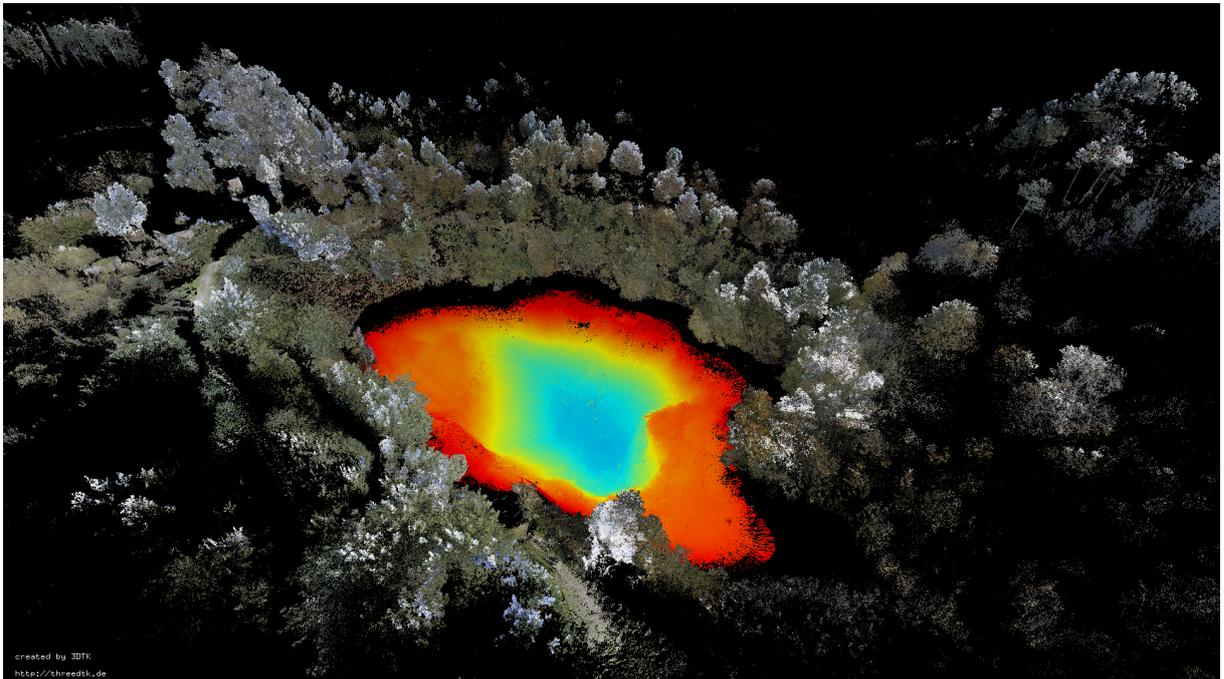


Abbildung 1.2: Eine 3D-Karte der Bejanca Miene in Portugal. Über Wasser wurden die Daten mit einem *Riegl VZ-400* in Verbindung mit einer Farbkamera aufgezeichnet, die Unterwasserdaten stammen von einem Sonargerät und sind in der Abbildung nach Höheninformationen, blau zu rot, eingefärbt.

Ein weiteres interessantes Einsatzgebiet bietet die moderne Archäologie oder 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 Marker, die sowohl in den Über- als auch in den Unterwasserpunktwolken zu sehen sind, ist eine 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.

1.2 Zielsetzung und wissenschaftlicher Beitrag

Da es in der Literatur nur wenige Arbeiten zum Erstellen von 3D-Scans von teilweise versenkten Strukturen gibt, soll im Rahmen dieser Arbeit ein Laser-Based Structured Light System (LbSLS), das zuvor für die Anwendung unter Wasser konstruiert wurde, dazu verwendet werden 3D-Informationen durch die Wasseroberfläche zu erstellen. Hierzu soll eine Methode entwickelt werden, 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 soll zunächst in einem einfachen Versuchsaufbau mit einem statischen System für eine einzelne Laserlinie getestet werden. Anschließend soll in einem größeren Aufbau der Scanner bewegt und so eine komplexe Szene aufgezeichnet werden. In diesem Schritt sollen ebenfalls der Einfluss verschiedener Winkel zwischen dem Scanner und der Wasseroberfläche betrachtet werden. Daraufhin soll der so entstandene Datensatz mit der hier entwickelten Methode korrigiert und die Fehler vor und nach der Korrektur untersucht werden.

Im Laufe der Arbeit 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 entstandenen 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 sichtbar, als auch in der Fehleranalyse.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Korrektur der Brechung an der Wasseroberfläche beim triangulationsbasierten 3D-Laserscannen. Begonnen wird in Kapitel zwei mit einem allgemeinen Überblick über 3D-Rekonstruktion unter Wasser. Es werden zuerst einige etablierte Methoden vorgestellt. Danach wird ein Überblick über häufig verwendete Sensorsysteme gegeben, die sich

der zuvor erläuterten Methoden bedienen. Anschließend wird der aktuelle Forschungsstand für den speziellen Anwendungsfall des Scannens durch eine Wasseroberfläche hindurch aufgezeigt.

Das dritte Kapitel beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen, die für den weiteren Verlauf der Arbeit von Bestand sind. Da es sich bei dem in dieser Arbeit verwendeten Scanner um einen SL-Laserscanner handelt, werden zunächst einige Grundlagen zur Kalibrierung von Kameras nach Zhang [92] erläutert. Anschließend wird eine von Steger [84] entwickelte Methode zur Extraktion von Linien aus Bildern näher betrachtet, um deren Funktionsweise darzulegen. Da die Brechung von Licht an der Grenzfläche zwischen unterschiedlichen Medien in dieser Arbeit eine tragende Rolle spielt, wird an dieser Stelle das Brechungsgesetz von Snell [7] betrachtet. Anschließend wird genauer erklärt, wie die Kalibrierung zwischen der Kamera und dem Linienlaser des verwendeten Systems durchgeführt wird. Unterteilt in einen allgemeinen Teil und den hier im speziellen betrachteten Fall des Mediumswechsels, wird daraufhin die Rekonstruktion der 3D-Punkte aus den aufgezeichneten Daten beschrieben.

Kapitel vier beschreibt zunächst den in dieser Arbeit verwendeten SL-Laserscanner, der im Vorfeld konstruiert und gebaut wurde. Anschließend werden Ergebnisse vom ersten Einsatz unter Wasser gezeigt und einige hierbei aufgetretene Probleme erläutert. Daraufhin wird der Versuchsaufbau und die hierzu benötigten Systeme, für die im nächsten Kapitel folgenden, Versuche beschrieben.

Das fünfte Kapitel beschäftigt sich mit der Auswertung der durchgeführten Versuche. Zunächst wird erklärt, wie es unterschiedliche Belichtungen der Bilder ermöglichen, die Wasseroberfläche ohne externe Markierungen zu detektieren und daraus die benötigte Ebenengleichung der Wasseroberfläche zu bestimmen. Daraufhin wird die zuvor erklärte Methode erstmals auf eine einzelne Linie angewendet. Hierzu wurde der Scanner statisch vor einem Wassertank platziert und als Objekt ein Schachbrett zur Hälfte ins Wasser gehängt. Da es sich bei dem Schachbrett um eine Ebene handelt, deren Lage sich im Kamerabild einfach bestimmen lässt, ermöglichte dies eine erste Beurteilung der Ergebnisse. Anschließend wird die Methode auf die, in dem größeren beschriebenen Versuchsaufbau, aufgezeichneten Daten angewendet. Da der Scanner hierbei auf fest definierten Bahnen wiederholbar bewegt wurde, lässt dies eine genaue Untersuchung der unterschiedlichen Winkel zwischen Wasseroberfläche und Scanner zu. Der Scanner wurde in 5° Schritten von 0° bis 20° durch zwei verschiedene Szenen bewegt. Anschließend wurde die Auswirkung der unterschiedlichen Winkel betrachtet und mit den korrigierten Daten verglichen. Dabei war der Einfluss des Einfallswinkels gut zu beobachten. Durch das Anwenden der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Korrekturmethode konnten an dieser Stelle gute Ergebnisse erzielt werden. Diese werden zuletzt anhand einiger planaren Flächen in einer der Szenen bewertet. Hierzu wird ein Objekt, dessen Oberfläche eine Ebene bildet, die sowohl über als auch unter Wasser zu sehen ist verwendet, um die Korrektheit der Methode, mittels der Winkel zwischen diesen Flächen über und unter Wasser, zu untersuchen.

Kapitel 2

State of the Art

Dieser Abschnitt gibt zunächst einen Überblick über etablierte Methoden und Verfahren zur Unterwasser-3D-Rekonstruktion. Anschließend werden einige Arbeiten vorgestellt, die sich mit der 3D-Erfassung durch die Wasseroberfläche beschäftigen.

2.1 3D-Rekonstruktion

Im Bereich der 3D-Rekonstruktion unter Wasser haben sich verschiedene Methoden etabliert. In folgendem Abschnitt werden zuerst diese Messmethoden vorgestellt und im Anschluss einige populäre Sensorsysteme näher betrachtet und deren Funktionsweise kurz erläutert.

2.1.1 Methoden

Im klassischen Sinne werden Sensoren in aktive und passive Sensoren unterteilt. Aktive Sensoren beschreiben hierbei jene, die aktiv auf die Szene wirken. Dies kann beispielsweise durch eine Beleuchtung, wie bei einem Laserscanner, oder Aussendung eines akustischen Signals, wie bei einem Sonar, stattfinden. Passive Sensoren hingegen fangen lediglich Informationen der Umgebung ein und senden selbst nichts aus. Eine Kamera ohne zusätzliche Beleuchtung oder Blitz, ist daher ein passiver Sensor. Dies ist jedoch nur eine sehr grobe Unterteilung der Methoden und da sich der größte Teil der Sensoren zur 3D-Rekonstruktion im Bereich der aktiven Sensoren befindet, ist es sinnvoll hier eine weitere Klassifizierung vorzunehmen. Hierbei lässt sich zwischen den Methoden *Time of Flight*, *Triangulation* und *Modulation* unterscheiden.

Time of Flight

Time of Flight (ToF) beschreibt ein Verfahren, bei dem die Laufzeit eines Signals gemessen und daraus die Entfernung bestimmt wird. Das ausgesendete Signal wird in der Szene reflektiert und

kehrt somit zum Sensor zurück, der die Zeit zwischen dem Aussenden und Empfangen misst. Aus den spezifischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Signals im vorliegenden Medium wird so nun die Distanz berechnet.

Probleme ergeben sich hierbei durch verschiedene Abhängigkeiten zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Veränderung der Umwelt. So ist bei der Verwendung eines Sonars die Laufzeit des Schalls im Wasser beispielsweise stark von der Temperatur, dem Salzgehalt und dem Druck abhängig. Ein weiteres bekanntes Beispiel für die Anwendung von *Time of Flight* sind LiDAR Systeme, die eine sehr häufige Anwendung in der mobilen Robotik besitzen.

Triangulation

Bei der *Triangulation* handelt es sich um eine geometrische Messmethode, die mittels trigonometrischer Formeln und exakter Winkelmessungen innerhalb von Dreiecken deren Lage zueinander bestimmt. Dies kommt beispielsweise bei Stereokameras zum Einsatz. Hierbei werden zwei Kameras zueinander kalibriert und in beiden Kamerabildern Punktkorrespondenzen gesucht. Anschließend kann durch die Information der Lage der beiden Kameras und des Punktes in den dazugehörigen Bildern die Tiefeninformation gewonnen werden.

Zu beachten sind hier, dass sich die Bilder der beiden Kameras in einem möglichst großen Bereich überlappen und dass der Abstand der beiden Kameras zueinander, die sogenannte *Baseline* einen großen Einfluss auf den Arbeitsbereich hat. Die minimale und maximale Distanz zwischen den zuverlässig messbaren Punkten variiert stark mit einer Veränderung der *Baseline*.

Auch die im weiteren Verlauf dieser Arbeit näher behandelten *Structured-Light-Laserscanner* machen sich diese Methode zu eigen. Hierbei werden nicht zwei Kameras, sondern eine Kamera und eine Lichtquelle zueinander kalibriert. Daraufhin kann aus den bekannten Parametern zwischen Lichtquelle und Bildsensor die Tiefeninformation bestimmt werden.

Modulation

Bei der *Modulation* wird nicht, wie bei Time of Flight (ToF), die Zeit die das Signal benötigt bis seine Reflexion beim Sensor eintrifft gemessen, sondern die Distanz wird aus der Phasenverschiebung berechnet. Dazu wird typischerweise die Amplitude des Signals moduliert, bei Lasern meist im GHz Bereich, und dieses anschließend ausgesendet. Wird die Reflexion dieses Signals erkannt, so werden das reflektierte und das originale Signal voneinander subtrahiert und nach der Demodulation der Abstand durch die Phasenverschiebung bestimmt. Für den Einsatz dieser Technik unter Wasser, in Verbindung mit einer Lichtquelle, ist die unterschiedliche Absorption im Wasser zu beachten.

2.1.2 Sensorsysteme

Dieser Abschnitt stellt einige Sensorsysteme, die sich für die Anwendung unter Wasser bewährt haben, vor. Alle bedienen sich einer der drei zuvor erläuterten Methoden zur Messung der Tiefendaten oder einer Kombination dieser. Weiter wird in jedem Abschnitt eine Tabelle mit Spezifikationen einiger zugehöriger Sensoren aufgeführt, die [50] entnommen wurde.

Sonar

Als Sonar wird ein Sensor bezeichnet, der im Wasser Schallwellen aufnimmt und diese analysiert. Hierbei wird zwischen einem aktiven und einem passiven Sonar unterschieden. Während das passive Sonar lediglich Schall empfängt, sendet das aktive Sonar selbst ein Signal aus und hört auf dessen Reflexionen.

Aufgrund der fehlenden Kenntnis über die räumliche Beziehung zwischen dem Sonar und der Schallquelle können passive Sonargeräte nicht zur 3D-Rekonstruktion verwendet werden. Hierbei handelt es sich meist um Systeme, die mithilfe von Datenbanken die aufgefangenen Geräusche vergleichen und somit die Art der Schallquelle identifizieren können.

Für die Gewinnung von 3D-Daten ist somit allein das aktive Sonar geeignet. Abhängig der Entfernung, die betrachtet werden soll, arbeiten Sonargeräte mit unterschiedlichen Frequenzen. Während ein Sonar für große Entfernungen mit niedrigen Frequenzen, im Bereich mehrerer Hundert kHz arbeitet, verwenden Sonare für den Nahbereich Frequenzen im MHz Bereich. Da es sich bei der Klassifizierung als aktives Sonar lediglich um einen sehr großen Überbegriff handelt, können sie, nach ihren verwendeten Methoden, in vier Gruppen unterteilt werden:

- MBS,
- Single Beam Sonar (SBS),
- Sidescan Sonar (SSS),
- Imaging Sonar (IS).

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in Wasser ist zwar von der Temperatur und dem Salzgehalt abhängig, jedoch ist sie deutlich größer als in Luft. Somit eignet sich ein Sonar auch für Aufnahmen aus sehr großer Entfernung. An einem Schiff befestigt, ist es möglich, über eine Distanz von mehreren Tausend Metern beispielsweise den Meeresgrund mit einer Genauigkeit im Bereich einiger Meter, aufzunehmen. Wird die Distanz verringert, in dem das Sonar zum Beispiel an einem AUV befestigt wird, so ist es bei Entfernungen von ca. 40 m möglich eine Genauigkeit von mehreren Zentimetern, siehe Tabelle 2.1, zu erreichen.

MBS sind vielfältig einsetzbar und gerade im Bereich der Bathymetrie beliebt. Diese lassen sich sehr einfach mit einer Kamera kombinieren, um somit zusätzliche Farbinformationen zu gewinnen. Auch wenn hierbei die Arbeitsreichweite auf die Sichtweite begrenzt wird. Neben dem Einsatz an einem Schiff, kann das MBS beispielsweise auch mit einer Dreh- und Schwenkeinheit an einem AUV oder auf einem Stativ befestigt werden, um somit komplette 3D-Scans zu erstellen. Die

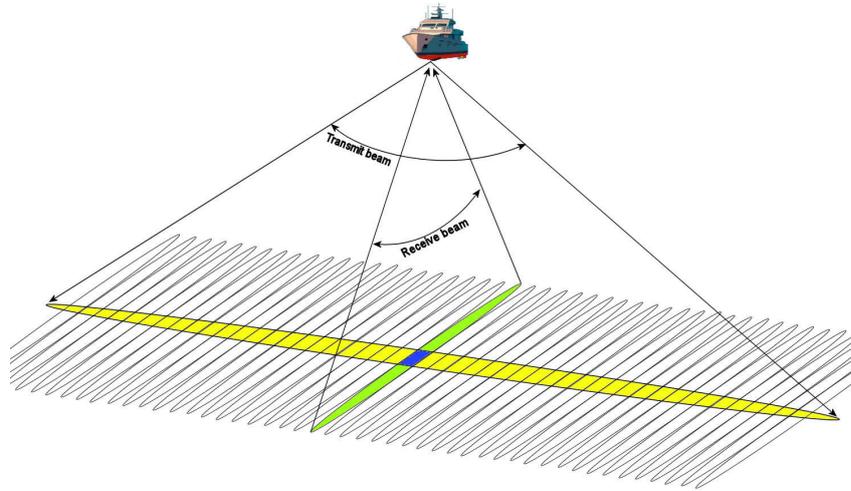


Abbildung 2.1: Funktionsweise eines MBS. Die Abbildung stellt das Sende- und Empfangsarray schematisch dar. Durch diese, sich überkreuzenden Arrays, ist es möglich die 3D-Informationen des Untergrunds zu bestimmen [2].

Funktionsweise eines MBS ist in der Abbildung 2.1 zu sehen. Vereinfacht lässt es sich durch ein Sende- und Empfangsarray, die senkrecht zueinander angeordnet sind, darstellen. Auf dem Sendearray befinden sich mehrere Module, die ein räumlich begrenztes Signal, einen sogenannten Beam, aussenden. Ebenso befinden sich auf dem Empfangsarray mehrere empfindliche Sensoren, die die Reflexion des Signals empfangen und dessen Laufzeit bestimmen. Somit ist es möglich, am Empfangsarray die Distanz und Richtung jedes einzelnen ausgesendetem Signals dadurch zu bestimmen, in der Reihenfolge und mit der Zeitverzögerung es bei den einzelnen Empfängern des Empfängerarrays ankommt.

Ebenfalls geeignet für einen vollständigen 3D-Scan, ist ein SBS. Hierfür ist es notwendig diese auf einer Dreh- und Schwenkeinheit zu befestigen und langsam durch die gesamte Szene zu bewegen, da das SBS im Gegensatz zum MBS nur jeweils einen Punkt zurückliefert, ist dies jedoch deutlich zeitaufwändiger.

Ein SSS hingegen eignet sich nicht, um damit 3D-Daten aufzuzeichnen, hiermit ist es lediglich möglich ein 2D-Abbild des Untergrunds, ähnlich einer Luftaufnahme, zu erzeugen. Dies liegt an der hier verwendeten Technik. Im Gegensatz zu einem MBS wird bei einem SSS kein gerichtetes Signal ausgesendet, sondern es werden quer zur Bewegungsrichtung des Sonars zwei fächerförmige, nach rechts und links, Impulse ausgesendet. Da somit die einzigen bekannten Parameter der Echos die Laufzeit und die Intensität sind, ist es nicht möglich, ein 3D-Abbild zu erstellen. Bei dieser Methode werden ausschließlich die Intensität der reflektierten Echos gemessen und ausgewertet. Moderne SSS hingegen verwenden zum Empfangen der Echos jedoch mehrere Sensoren, die in einem Array angeordnet sind, um auch hier, ähnlich einem MBS Tiefeninformationen zu erhalten und ein 3D-Abbild erstellen zu können. In Abbildung 2.2 ist eine solche Aufnahme von einem Schiffswrack zu erkennen. Die weiße Linie in der Mitte stellt hierbei den Bewegungspfad des Sonars da, die schwarzen Bereiche rechts und links dieser Linie liegen außerhalb des Arbeitsbereichs

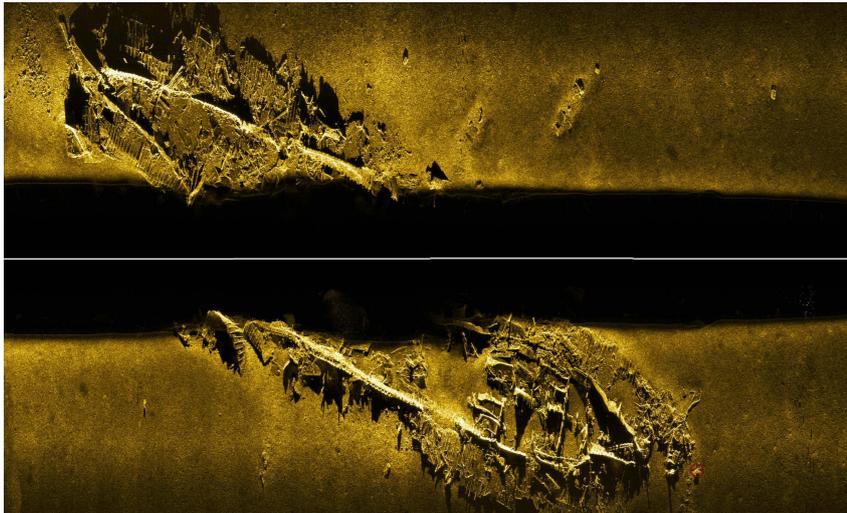


Abbildung 2.2: Beispielaufnahme eines Schiffswracks, aufgenommen mit einem SSS von EdgeTech [3].

des Sonars. Diese Blindflecken entstehen durch die zwei fächerförmigen Impulse, die keinen Überlappungsbereich haben.

IS bezeichnet ein MBS oder SBS, das einen großen Öffnungswinkel besitzt und es somit ermöglicht, größere Flächen auf einmal zu erfassen. Es handelt sich daher lediglich um einen Überbegriff, der verschiedene Systeme vereint.

Tabelle 2.1: Auflistung einiger Sonarsysteme zur 3D-Rekonstruktion [50].

Referenzen	Typ	Anwendung	Genauigkeit	Auflösung
Pathak [66]	MBS	grobe Karte zur Pfadplanung	≈ 1 m	2,5 cm
Rosenblum [72]	MBS	Rekonstruktion kleiner Objekte	-	≈ 8 cm
Hurtos [39]	MBS + Kamera	Projektion von Bildern auf 3D-Oberflächen	2,34 cm	-
Guo [34]	SBS	Rekonstruktion kleiner 3D-Objekte	2,62 cm	-
Coiras [27]	SSS	grobe Geometrie der Szene	19 cm	5,8 cm
Brahim [18]	IS	dünn besetzte Szenengeometrie	0,5 m	-
Aykin [10]	IS	gleichmäßige Oberflächen Rekonstruktion	≈ 15 cm	1 cm
Negahdaripour [61]	IS + Kamera	Alternative zu Stereosystemen	≈ 5 cm	-

Light Detection and Ranging

Light Detection and Ranging (LiDAR) Systeme senden einen Laserpuls aus und messen die Laufzeit, bis die Reflexion dieses Lichtstrahls zurück kommt. Um diese eindimensionalen Messungen nun um eine Dimension zu erweitern, wird meist ein Spiegel vor dem Laser positioniert, der sich in hoher Geschwindigkeit dreht. Wie in Abbildung 2.3 zu erkennen, rotiert der Spiegel so vor dem Laser und dem Sensor, dass es nun möglich ist, eine Linie anstelle nur eines einzelnen Punktes zu messen, ohne den Scanner zu bewegen. Um einen vollständigen 3D-Scan zu erhalten,

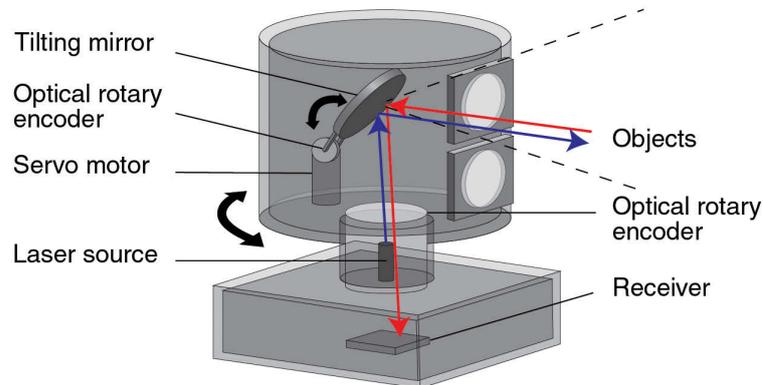


Abbildung 2.3: Grundlegender Aufbau eines LiDAR Scanners. Hierbei wird ein Laserstrahl ausgesendet und die Zeit gemessen, die seine Reflexion zurück zum Sensor benötigt. Um einen vollständigen 3D-Scan erstellen zu können, wird mithilfe eines rotierenden Spiegels eine Linie erzeugt und diese durch eine Rotation um die Mittelachse des Scanners vertikal zum Spiegel um 360° gedreht [6].

wird nun die gesamte Einheit vertikal zur Drehrichtung des Spiegels gedreht. Hierbei bestimmt die Drehgeschwindigkeit die Winkelschritte zwischen den einzelnen Messlinien und somit die Auflösung des Scans. Je nach Einsatzzweck gibt es Modelle mit einer hohen Updaterate oder mit einer hohen Auflösung. Im Umfeld des autonomen Fahrens spielt eine hohe Updaterate beispielsweise eine größere Rolle, als eine hohe Auflösung des Scans, wohingegen beim terrestrischen Laserscanning häufiger die Auflösung im Vordergrund steht. LiDAR Scanner sind eine beliebte Wahl im Bereich der mobilen Kartierung, des autonomen Fahrens und in der Vermessung, auch für sogenanntes *Airborne Laserscanning*, bei dem der Scanner an einem Flugzeug oder einem Quadrocopter befestigt wird, werden diese häufig eingesetzt. Bei zusätzlicher Verwendung einer, beispielsweise RGB- oder Thermalkamera, können diese Scans ebenfalls durch zusätzlichen Informationen erweitert werden [17].

Abhängig von der Wellenlänge des verwendeten Lasers, ist es möglich einen LiDAR Scanner zum Scannen in Luft, von Luft in Wasser und auch vollständig unter Wasser zu verwenden. Mit einigen Scannern zum *Airborne Laserscanning* ist es möglich, einige Meter unter die Wasseroberfläche vorzudringen. Für das Verwenden im Wasser eignen sich, auf Grund der geringeren Absorption, ein grüner Laser, im Bereich von 532 nm, am besten.

Tabelle 2.2: Auflistung einiger LiDAR Systeme zur 3D-Rekonstruktion [50].

Referenzen	Klasse	Wellenlänge	LiDAR Model	Kombination	Genauigkeit	Auflösung
Reineman [70]	ToF	905 nm	Riegl LMS-Q240i	Kamera, GPS	0,42 m	0,5 m
Cadalli [24]	ToF	532 nm	U.S. Navy Prototyp	PMT + 64×64 CCD	-	≈ 10 m
Pellen [67]	UWTD	532 nm	ND:YAG Laser	PMT	-	-
Mullen [57, 58]	UWTD	532 nm	ND:YAG Laser	PMT	-	-

Laser Line Scanning

Eine Möglichkeit eine höhere Auflösung zu erzielen, als bei den Systeme in Tabelle 2.2, ist die Verwendung eines Linienlasers in Verbindung mit einer Kamera. Für die Anwendung in Luft sind rote Laser sehr verbreitet, da es hier eine sehr große Auswahl an preisgünstigen Modellen gibt. Unter Wasser sind grüne Laser im Bereich von 532 nm beliebt, da sie einen guten Kompromiss zwischen Kosten, Leistung und Absorption bieten.

Beim *Laser Line Scanning* (LLS) wird zwischen drei grundlegenden Methoden unterschieden, dem Continuous Wave Laser Line Scanning (CW-LLS), Pulse Gated Laser Line Scanning (PG-LLS) und Modulated Laser Line Scanning (Mod-LLS). Alle diese drei Verfahren projizieren eine Laserlinie in die Umgebung, zeichnen diese mit einem Kamerasensor auf und werten im Anschluss die erkannte Linie aus, um daraus die Szene zu rekonstruieren. Sie unterscheiden sich hauptsächlich in der Art, in der sie die Laserlinie aussenden, diese wird im folgenden kurz erklärt. Eine Auflistung einiger solcher Laser Line Scanning (LLS) Systeme findet sich in der Tabelle 2.3.

Tabelle 2.3: Auflistung einiger LLS Systeme zur 3D-Rekonstruktion [50].

Referenzen	Aim	Klasse	Wellenlänge	Empfänger	Genauigkeit	Auflösung
Moore [55]	3D	CW-LLS	532 nm	Linescan CCD	-	1 mm
Moore [54]	3D	CW-LLS	532 nm	Linescan CCD	-	3 mm
McLeod [52]	3D	PG-LLS	-	-	7 mm	1 mm
Cochenour [25]	3D	Mod-LLS	532 nm	PMT	-	-
Rumbaugh [73]	3D	Mod-LLS	532 nm	APD	4,5 cm	1 cm
Dominicis [30]	3D	Mod-LLS	405 nm	PMT	5 mm	1 mm
Dalgleish [28]	Img	CW-LLS	532 nm	PMT	-	-
Dalgleish [28]	Img	PG-LLS	532 nm	PMT	-	-
Gordon [33]	Img	PG-LLS	488-514,5 nm	PMT	-	-
Mullen [56]	Img	Mod-LLS	532 nm	PMT	-	-

Continuous Wave Laser Line Scanning *Continuous Wave Laser Line Scanning* (CW-LLS) bestimmen die Distanz zu einem Zielpunkt mit Hilfe von Triangulation, hierfür wird eine Kamera und eine Lichtquelle, wie z.B. ein Laser benötigt. Die Tiefe D eines Punktes, zu sehen in Abbildung 2.4, kann durch

$$D = L_1 \cos(\omega) \quad (2.1)$$

bestimmt werden. Die Distanz L_1 , zwischen Kamera und dem betrachteten Punkt, lässt sich durch

$$L_1 = \frac{S \cos(\theta)}{\sin(\theta - \omega)} \quad (2.2)$$

beschreiben, mit den weiteren Annahmen

$$\sin(\theta - \omega) = \frac{O}{L_1}, \text{ und } O = S \cos(\theta) \quad (2.3)$$

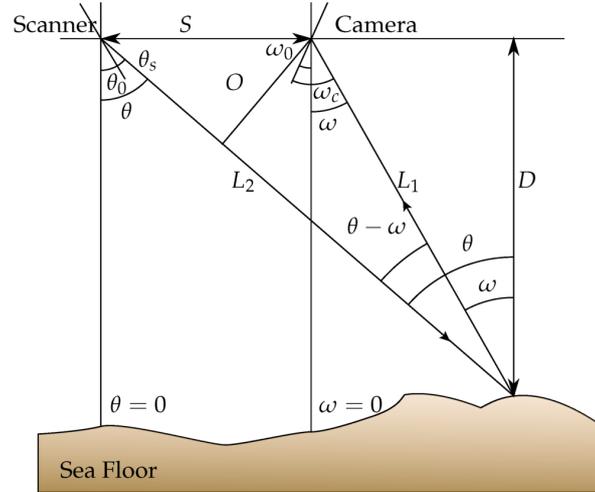


Abbildung 2.4: Geometrie für die Bestimmung der Distanz mittels Triangulation [50].

lässt sich die Gleichung (2.1) zu

$$D = \frac{S}{\tan(\theta) - \tan(\omega)} \quad (2.4)$$

umstellen. Die Winkel θ und ω beschreiben hierbei die Pixel-Blickwinkel des Scanners und der Kamera und S den Abstand zwischen den Mittelpunkten des Scanners und der Kamera. Die Winkel ω_0 und θ_0 in der Abbildung 2.4 beschreiben den Offset der Winkel in denen Scanner und Kamera montiert wurden. Der Blick- und Strahlwinkel von Kamera und Laser werden durch ω_c und θ_s beschrieben. Somit ergibt sich

$$\theta = \theta_0 + \theta_s \quad (2.5)$$

$$\omega = \omega_0 + \omega_c \quad (2.6)$$

für die beiden Winkel, dies kann nun in die Gleichung (2.4) eingesetzt werden:

$$D = \frac{S}{\tan(\theta_0 + \theta_s) - \tan(\omega_0 + \omega_c)}. \quad (2.7)$$

Wurden ω_0 und θ_0 nun durch eine Kalibrierung bestimmt, ist es mit dieser Gleichung möglich, die Tiefeninformationen zu bestimmen.

Pulse Gated Laser Line Scanning Hierbei handelt es sich um eine Mischung aus ToF Sensor und Triangulation, bei dem, im Gegensatz zum CW-LLS, die Laserlinie nicht kontinuierlich die Szene beleuchtet, sondern in kurzen Impulsen ausgesendet wird. In dem speziellen Fall der Verwendung unter Wasser tritt häufig das Problem auf, dass hierbei Licht gemessen wird, das nicht vom eigentlichen Objekt sondern von Schwebeteilchen im Wasser reflektiert wird. Dies lässt sich bei einem *Pulse Gated Laser Line Scanning* (PG-LLS) verhindern, in dem der Sensor

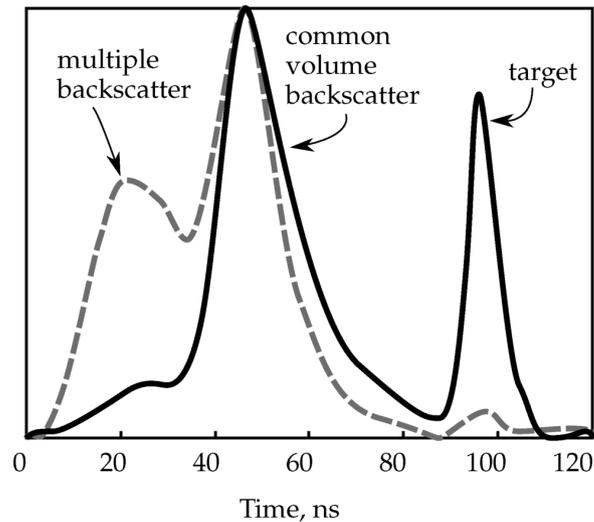


Abbildung 2.5: Signalstärke der Reflexion über die Zeit nach Aussenden des Signals. Um Fehlmessungen zu verringern wird der Verschluss des Sensors die ersten 80 ns geschlossen [50].

mit einem Verschluss verdeckt wird und nur für einen sehr kleinen Zeitbereich geöffnet wird, wie in Abbildung 2.5 beispielsweise zwischen 80 und 120 ns. Somit lässt sich der Arbeitsbereich eingrenzen und die Fehlmessungen durch andere Reflexionen verringern. Bisher gab es einige experimentelle Versuche, bei denen Genauigkeiten von bis zu 7 mm über eine Distanz von 30 m, bei guten Sichtverhältnissen, erreicht werden konnten [52].

Modulated Laser Line Scanning Beim *Modulated Laser Line Scanning* (Mod-LLS) werden zur Bestimmung der Distanz keine räumlichen oder zeitlichen Merkmale verwendet, sondern die Distanz wird anhand der Phasenverschiebung der Frequenzen des ausgesendeten Signals berechnet. Hierbei werden das originale und das reflektierte Signal voneinander subtrahiert und anschließend der Abstand durch eine Demodulation bestimmt. Ein Beispiel für einen solchen Aufbau von Mullen et al. [56] ist in Abbildung 2.6 zu sehen. Diese entwickelten einen Mod-LLS der mit einer Laserlichtquelle ein Gegenstand beleuchtet und durch Modulation das Streulicht entfernt und die Entfernung bestimmt. Hierbei experimentierten sie mit unterschiedlichen Frequenzbereichen und stellten fest, dass eine hohe Frequenz von 90 MHz deutlich weiter reicht, als niedrige Frequenzen von nur 50 MHz oder 10 MHz.

In der Arbeit von Rumbaugh et al. [73] wird beispielsweise ein Mod-LLS zur 3D-Rekonstruktion verwendet und hierbei eine Genauigkeit von 1 cm auf eine Distanz von 60 cm festgestellt. De Dominicis et al. [30] verwendeten einen 405 nm blauen Laser mit einer Frequenz von 80 MHz und erhielten bei der Rekonstruktion eines 8,5 m entfernten Objekts einen Fehler von 5 %.

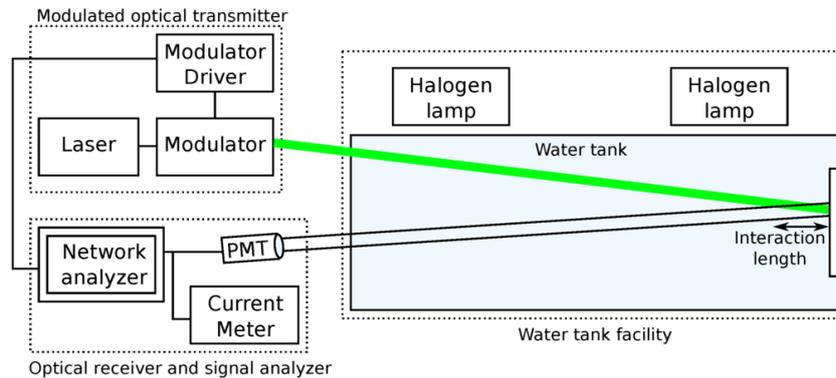


Abbildung 2.6: Experimentelle Aufbau eines Mod-LLS von Mullen et al. [56] mit einem Laser als Lichtquelle und einem Zielobjekt im Wasser [50].

Structured Light

Für *Structured Light* (SL) wird zunächst eine Kamera und ein Projektor benötigt. Mit dem Projektor wird ein bekanntes Muster in die Szene projiziert und dieses, nach dem Prinzip der Triangulation, rekonstruiert. Hierbei gibt es zwei Methoden, bei der einen muss der Projektor relativ zur Kamera fixiert und dies zueinander kalibriert sein, bei der anderen Methode ist es möglich, den Projektor zu bewegen, während die Kamera statisch in der Szene stehen muss [13]. Auf dieser Idee basierend wurden über die Jahre etliche Arbeiten mit unterschiedlichen Projektionsmustern veröffentlicht, eine Überblick über dies ist in [74] und [32] zu finden.

Bei der Verwendung von Projektoren werden häufig binäre Muster, ähnlich dem in der Abbildung 2.7 zu sehendem, verwendet. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung eines Lasers anstelle eines Projektors, auch LbSLS genannt. Hierbei werden häufig Punktmuster oder Linien (Laser Stripe (LS)) auf das zu Rekonstruierende Objekt projiziert. Im Anwendungsbereich für die Unterwasser 3D-Rekonstruktion finden sich meist Laser, die entweder eine, bzw. mehrere parallele Linien oder ein Kreuz projizieren.

Begrenzt durch die Sichtweite unter Wasser werden diese Systeme meist auf Entfernungen zwischen 2 m und 3 m eingesetzt [15, 41, 48, 71]. Die hierbei erreichten Genauigkeiten bewegen sich dabei in einem Bereich von unter 1 cm, ein genauere Überblick ist der Tabelle 2.4 zu entnehmen. Um eine möglichst gleichförmige Bewegung des Systems zu erhalten, wird es für Aufnahmen meist an einem AUV befestigt.

Photometric Stereo

Als eine etwas schneller umzusetzende Methode als SL, da kein Projektor benötigt wird, eignet sich für viele Fälle auch das *Photometric Stereo* (PhS). Hierbei wird eine Kamera statisch vor dem zu scannenden Objekt platziert und dieses anschließend von einer Lichtquelle aus verschiedenen Richtungen beleuchtet. Narasimhan und Nayar [60] beschreiben eine Methode, in der sie aus

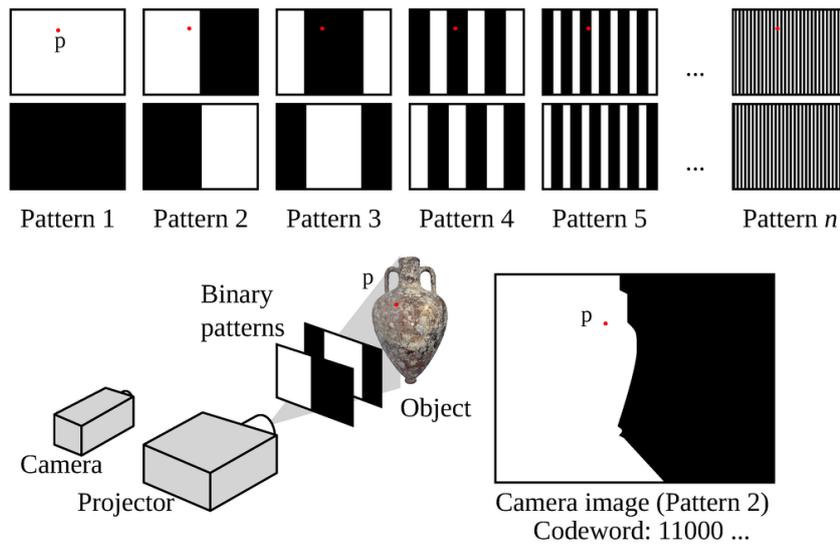


Abbildung 2.7: Beispiel für ein binäres Projektionsmuster für SL mit einer Kamera und einem Projektor [50].

vier Bildern, auf denen das Objekt von unterschiedlichen Positionen aus beleuchtet wurde, eine 3D-Rekonstruktion des Objektes durchführen können. In der Abbildung 2.8 sind vier solche Aufnahmen eines Objektes zu sehen, wobei die Lichtquelle auf jedem Bild an einem anderen Ort platziert wurde. Das Bild unten in der Abbildung 2.8 zeigt die 3D-Rekonstruktion aus diesen vier Bildern.

Zwar zeigte Tsiotsios et al. [87] das bereits drei Bilder mit einer gut gewählten Belichtung ausreichend sind, um das Objekt vollständig zu rekonstruieren, dennoch ist die Anwendung dieser Technik auf einige spezielle Anwendungen beschränkt. Da sich sowohl die Kamera, als auch das Objekt nicht bewegen dürfen, während die Lichtquelle an mindestens drei, gut gewählten, Positionen platziert werden muss, eignet sich die Methode lediglich für statische Objekte. Ebenfalls muss die Sichtweite entsprechend gut sein und das Wasser darf keinen zu hohen Trübungsgehalt aufweisen. Da die Auflösung der Rekonstruktion mit zunehmender Entfernung zwischen Kamera und Objekt schnell schlechter wird, darf auch dieser nicht zu groß sein, was wiederum die Größe der Objekte beschränkt.

Structure from Motion

Ähnlich wie bei dem zuvor erklärten PhS wird bei Structure from Motion (SfM) nur eine Kamera benötigt, mit der kontinuierlich Bilder aufgenommen werden. Währenddessen wird die Kamera langsam über und um das zu scannende Objekt bewegt, um dieses möglichst vollständig zu erfassen. Anschließend werden in den Bildern anhand von bestimmten Merkmalen, die beispielsweise mit Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) und Speeded Up Robust Features (SURF) Verfahren bestimmt werden, Gemeinsamkeiten gesucht, um die überlappenden Bereiche zu finden. Anhand

Tabelle 2.4: Auflistung einiger SL Systeme zur 3D-Rekonstruktion [50].

Referenzen	Typ	Farbe/Wellenlänge	Projektionsmuster	Genauigkeit	Auflösung
Zhang [91]	SL	Graustufen	Sinusoidal Fringe	≈ 1 mm	-
Tornblim [86]	SL	Weiß	Binäres Muster	4 mm	0,22 mm
Bruno [21]	SL	Weiß	Binäres Muster	0,4 mm	0,3 mm
Narasimhan [60]	SL	Weiß	Light Plane Sweep	9,6 mm	-
Bodenmann [14, 16]	LS	532 nm	Laserlinie	-	-
Yang [90]	LS	532 nm	Laserlinie	-	-
Kondo [46]	LS	532 nm	Laserlinie	-	≈ 1 cm
Tetlow [85]	Mot. LS	532 nm	Laserlinie	1 cm	5 mm
Hildenbrandt [36]	Mot. LS	532 nm	Laserlinie	-	-
Parts [69]	Mot. LS	532 nm	Laserlinie	≈ 1 cm	-
Nakatani [59]	Mot. LS	532 nm	Laserlinie	≈ 1 cm	-
Jakas [30, 48]	Dual LS	405 nm	Laserlinie	-	≈ 1 cm
Massot [49]	LbSLS	532 nm	25 Laserlinie	3,5 cm	-

dieser Informationen und gemeinsam mit den zuvor bestimmten intrinsischen Parameter der Kamera, lassen sich nun die Tiefeninformationen berechnen.

Ein Vorteil von SfM ist, dass wenig Hardware benötigt wird und es mit geringem Aufwand und niedrigen Kosten auf einem mobilen System integriert werden kann. Es wird lediglich eine Foto- oder Videokamera und ausreichend Speicher benötigt, um kontinuierlich aufzuzeichnen. Diese Daten können im Anschluss weiterverarbeitet werden, um die nötigen 3D-Informationen zu gewinnen.

Im Unterwasser Bereich treten jedoch einige zusätzliche Schwierigkeiten auf. Effekte wie z.B. Diffusion, ungleichmäßiges Licht und die unterschiedliche Absorption der Farben, machen es schwierig, Merkmale mit SIFT und SURF aus unterschiedlichen Blickwinkeln zu finden und zuverlässig zusammenzufügen. Eine weitere Herausforderung stellt das Scannen aus der Luft in Wasser dar, da hier einige weitere Effekte wie Lichtbrechung an der Oberfläche und Wellen hinzukommen.

Tabelle 2.5: Auflistung einiger SfM Systeme zur 3D-Rekonstruktion [50].

Referenzen	Feature	Matching Method	Genauigkeit	Auflösung
Sedlazeck [79]	Corner	Linescan CCD	-	-
Pizarro [68]	Harris	Linescan CCD	3,6 cm	-
Meline [53]	Harris	-	-	-
McKinnon [51]	SURF	PMT	0,7 mm	-
Jordt-Sedlazeck [44]	-	APD	-	-
Cocito [26]	Silhouettes	PMT	≈ 1 cm	-
Bruno [22]	SIFT	PMT	4,5 mm	-
Nicosevici [62]	SIFT	PMT	11 mm	-
Ozog [64]	SIFT	PMT	0,45 m	-

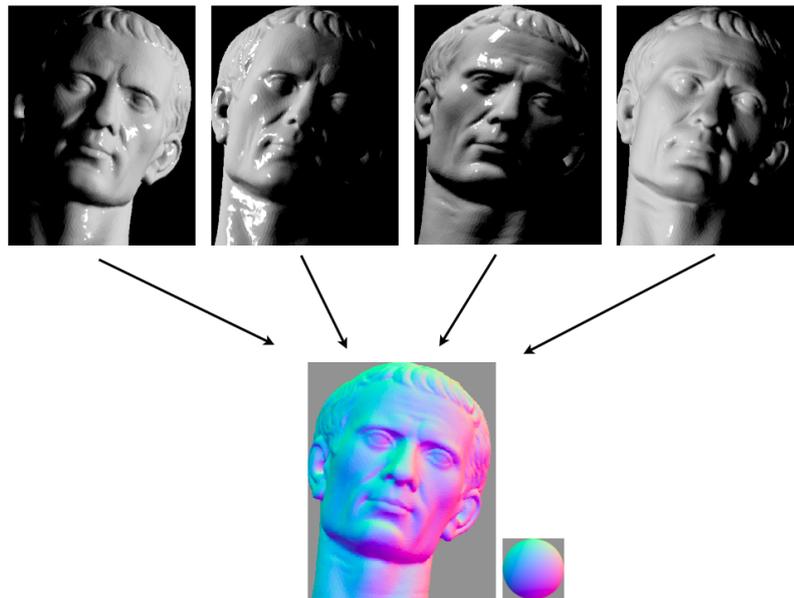


Abbildung 2.8: 3D-Rekonstruktion mit PhS aus vier unterschiedlich belichteten Bildern von einem statischen Objekt in Grau. Das farbige Bild unten zeigt das Ergebnis nach der Rekonstruktion [89].

Stereo Vision

Stereo Vision (SV) bedient sich den gleichen Prinzipien wie SfM, jedoch werden hier zwei Kameras verwendet. Eine mögliche Konfiguration ist in Abbildung 2.9 zu erkennen. Zunächst werden die Bilder der beiden Kameras des Systems anhand von Bildmerkmalen miteinander kombiniert, um daraus die 3D-Informationen zu gewinnen. Durch die Kalibrierung der beiden Kameras zueinander ist es ebenfalls möglich, eine Skalierung zu bestimmen. Wurden für jeden Bildsatz die 3D-Informationen bestimmt, so können diese mittels einem Iterative Closest Point (ICP) oder Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) zu einem Datensatz kombiniert werden.

Die erste Anwendung fand SV in dem Bereich der Erstellung von Karten aus Luftbildern. Seit

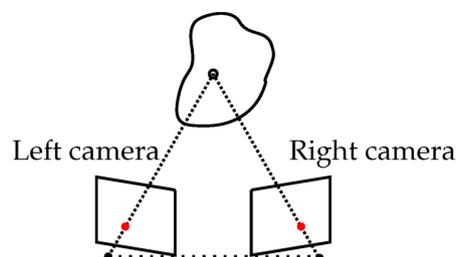


Abbildung 2.9: Aufbau eines SV Systems [50].

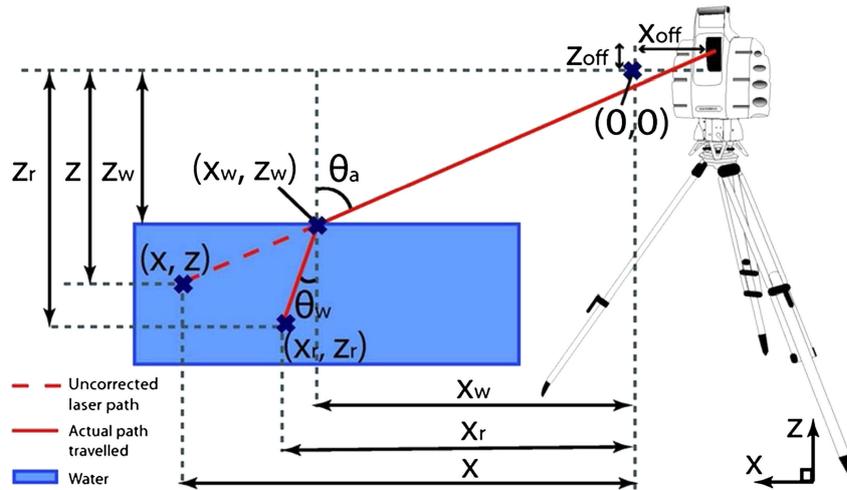


Abbildung 2.10: Versuchsaufbau von Smith et al. für das Scannen eines Flussbetts durch die Wasseroberfläche mit einer *Leica ScanStation TLS* [82].

diesem Zeitpunkt wurde sich sehr intensiv mit den Möglichkeiten von SV auseinandergesetzt und es gibt unzählige Projekte mit der Anwendung von SV über, wie auch unter Wasser. Ein ausführlicher Bericht hierzu finden sich den Ausarbeitungen von [11, 20, 29, 77, 80], sowie eine Zusammenfassung und ein Vergleich einiger Verfahren in der Tabelle 2.6.

Tabelle 2.6: Auflistung einiger SV Systeme zur 3D-Rekonstruktion [50].

Referenzen	Feature	Matching Method	Baseline	Genauigkeit	Auflösung
Kumar [47]	SIFT	RANSAC und ICP	-	-	-
Jasiobedzki [43]	SIFT	SIFT3D und SLAM	-	-	-
Nurtantio [9]	SIFT	SIFT	8 und 16 cm	-	-
Schmidt [78]	SIFT	SIFT	35 mm	-	3 mm
Brandou [19]	SIFT	SIFT	-	-	-
Beall [12]	SURF	SURF und SLAM	60 cm	-	-
Servos [81]	-	ICP	12 cm	26,4 cm	-
Hogue [38]	Ecken	KLT Tracker	12 mm	2 cm	-
Inglis [40]	SIFT	SIFT	42,5 cm	-	-

2.2 3D-Erfassung durch die Wasseroberfläche

In der Vergangenheit gab es bereits einige Wissenschaftler, die sich mit der speziellen Problematik, die das Scannen durch die Wasseroberfläche hindurch bietet, auseinandergesetzt. Bei diesen kamen bereits verschiedene Methoden, von SL über ToF und SV zum Einsatz.

Smith et al. [82] verwendeten ein *Leica ScanStation TLS* mit einem 532 nm Laser um den Grund eines Flussbetts zu scannen. Eine schematische Darstellung ihres Versuchsaufbaus ist in der

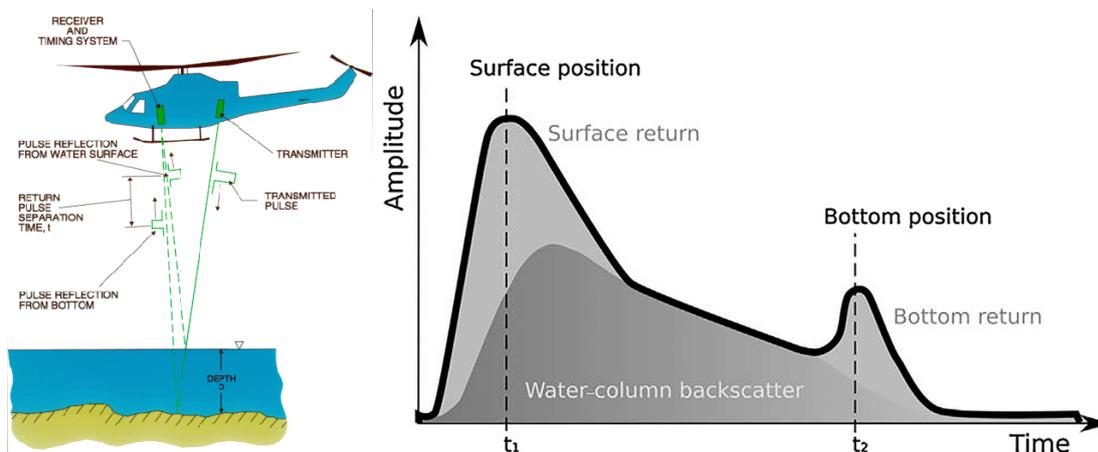


Abbildung 2.11: Links im Bild der Aufbau mit einem LiDAR an einem Hubschrauber für das Scannen durch die Wasseroberfläche aus dem Projekt *SHOALS* [42]. Rechts im Bild eine typische Wellenform der Reflexion eines LiDAR Systems vom Grund eines Gewässers und von der Wasseroberfläche [76].

Abbildung 2.10 zu sehen. Da es sich hierbei um ein ToF System handelt, wird jeweils nur ein einzelner Laserstrahl ausgesendet, der in beide Richtungen den gleichen Pfad beschreibt. Dies vereinfacht das Problem der Lichtbrechung an der Wasseroberfläche und es lässt sich mit Hilfe des Snelliussches Brechungsgesetzes ohne Schwierigkeiten berechnen. Um Wellen als Fehlerquelle auszuschließen, platzierten sie einen Kasten um den zu scannenden Bereich. An diesem Kasten wurde ebenfalls eine Messlatte befestigt, die dazu verwendet wurde, um die Lage der Wasseroberfläche bestimmen zu können, an der der Laserstrahl gebrochen wird. Hierbei stellten sie fest, dass bereits ein kleiner Fehler bei der Bestimmung der Wasseroberfläche, einen großen Einfluss auf die Fehler der 3D-Rekonstruktion hat. Auf eine Distanz von ca. 2 m konnten sie im Schnitt eine Genauigkeit von 13,5 mm in der z-Achse und 96,8 mm in der x-Achse erreichen.

Weiter werden LiDAR Systeme in einigen Projekten verwendet, um Küstengebiete oder Flussläufe aus der Luft zu vermessen [37, 42, 76, 88]. Hierbei wird ein LiDAR Scanner an einem Flugzeug, Hubschrauber oder Drohne befestigt und mit diesem der Bereich abgeflogen. Dies ermöglicht das Abdecken eines großen Zielgebietes in relativ kurzer Zeit. Aufgrund der Absorption des Wassers wird hierfür meist ein frequenzverdoppelter Nd:YAG Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm verwendet [88]. In *SHOALS* [42], einem Projekt zur Kartierung von Küstengebieten, wurde eine Kombination aus zwei Lasern, einem grünen 532 nm und einem infraroten 1064 nm, die an einem Hubschrauber montiert wurden, verwendet. Die Informationen über den Grund und die Wasseroberfläche zur 3D-Rekonstruktion werden hierbei aus der Wellenform der Reflexion bestimmt. Wie in der Abbildung 2.11 zu erkennen ist, lässt sich an der Amplitude des Signals sehr gut erkennen, ob es sich um eine Reflexion an der Wasseroberfläche oder vom Grund des Gewässers handelt. Eine exakte mathematische Beschreibung dieser Methode findet sich in der Arbeit von Wang et al. [88].

Narasimhan et al. [60] untersuchten die Anwendung von SL für die 3D-Rekonstruktion durch eine Wasseroberfläche. Mithilfe eines Beamers projizierten sie ein Muster in ein, mit Wasser

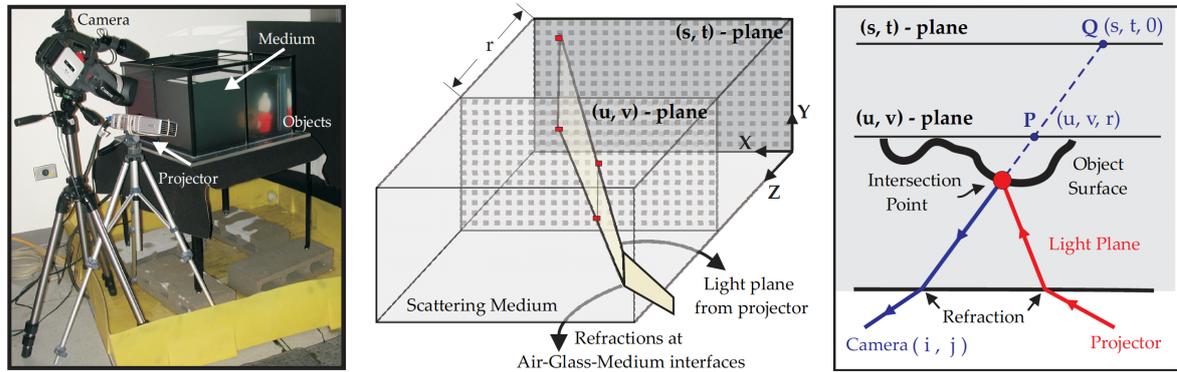


Abbildung 2.12: Versuchsaufbau von Narasimhan et al. für SL durch die Wasseroberfläche mithilfe einer Kamera und eines Beamers auf dem linken Bild. Das mittlere zeigt die unterschiedlichen Ebenen, die zur Kalibrierung verwendet werden. Auf dem rechten Bild ist eine Draufsicht auf den Aufbau zu sehen und der Verlauf der Lichtstrahlen, der zur Korrektur der 3D-Rekonstruktion benötigt wird [60].

gefülltes, Aquarium auf ein Objekt und filmten dies mit einer Kamera. Ihr Versuchsaufbau ist in dem linken Bild der Abbildung 2.12 zu sehen. Wie im rechten Bilder der Abbildung 2.12 zu erkennen ist, ist bei diesem Aufbau, 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. Dies führt dazu, dass es notwendig wird, 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. In der mittleren Grafik der Abbildung 2.12 sind diese beiden als (u, v) -Ebene und (s, t) -Ebene gekennzeichnet. 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.

Ähnlich zu Narasimhan et al. [60] verwendeten auch Sarafranz und Haus [75] einen Beamer um ein Punktmuster durch die Wasseroberfläche zu projizieren. Allerdings befindet sich in ihrem Aufbau nur der Projektor über der Wasseroberfläche und die Kamera ist unter Wasser platziert. Durch diese Konfiguration wird der beobachtete Lichtstrahl nur einmal an der Wasseroberfläche gebrochen. Da auch hierbei jeder einzelne Punkt exakt zurück zu verfolgen ist, kann die Brechung für jeden erkannten Punkt des Projektionsmusters exakt berechnet werden. In einem wesentlichen Teil dieser Arbeit befassen sich die Autoren damit, das Punktmuster durch eine Wellenoberfläche zu projizieren. Hierbei ist jedoch die Einschränkung zu beachten, dass es sich hierbei lediglich um definierte Sinuswellen in einer kontrollierten Umgebung handelt und der Projektor stets senkrecht zur Wasseroberfläche positioniert ist. Mit einer Entfernung zwischen dem Projektor und der Wasseroberfläche von ca. 1,2 m und einer Wassertiefe von ca. 0,3 m ist der erzielte Fehler < 4 mm.

Ebenfalls beschäftigten sich Klopfer et al. [45] mit einem SL Sensor, um mit diesem durch die Wasseroberfläche 3D-Daten zu rekonstruieren. Hierfür kam eine *Microsoft Kinect* zum Einsatz. In

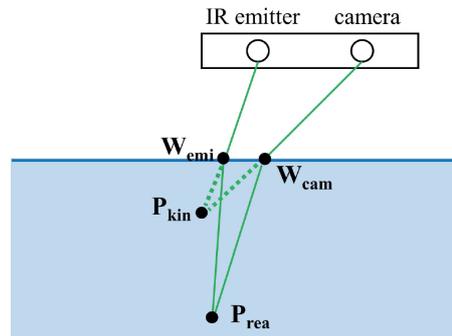


Abbildung 2.13: Die Abbildung zeigt den Aufbau von Klopfer et al. [45]. Die *Kinect* befindet sich über der Wasseroberfläche, die Punkte W_{emi} und W_{cam} bezeichnen die Schnittpunkte des Projektions- und Kamerastrahls mit der Wasseroberfläche. P_{kin} ist der von der *Kinect* bestimmte 3D-Punkt, bei dem die Brechung an der Wasseroberfläche noch nicht berücksichtigt wurde, der Punkt P_{rea} ist der korrigierte Punkt.

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. In der Abbildung 2.13 ist der Aufbau und die, sich durch die Brechung am Wasser ergebende, Geometrie für die Rekonstruktion der Punkte zu erkennen. Der Punkt P_{kin} ist der von der *Kinect* bestimmte 3D-Punkt, der jedoch die Brechung an der Wasseroberfläche nicht berücksichtigt und somit falsch ist. Um diesen Punkt zu korrigieren und den richtigen Punkt P_{real} zu erhalten wird nun je eine Gerade zwischen dem Punkt P_{kin} und dem Projektionszentrum der Kamera und des IR-Projektors konstruiert. Anschließend werden die Schnittpunkte W_{emi} und W_{cam} dieser beiden Geraden und der Wasseroberfläche bestimmt. Nun wird an diesen Punkten die Brechung dieser beiden Geraden berechnet, um so den korrekten Verlauf dieser unter Wasser zu erhalten. Der korrigierte Punkt P_{rea} ist nun der Schnittpunkt dieser beiden, um den Brechungswinkel an dem Schnittpunkt zur Wasseroberfläche gedrehten, Geraden. Um die gesamte Punktwolke zu korrigieren wird dies für jeden Punkt wiederholt. Mit dieser Methode errichten Klopfer et al. [45] für eine Wassertiefe von bis zu 20 cm, was einer Gesamtentfernung von ca. 60 cm entspricht, einen Root-Mean-Square (RMS) Fehler von 3 mm. Damit bewegen befinden sie sich im gleichen Genauigkeitsbereich, der auf diese Entfernung mit der *Kinect* auch über Wasser erreicht werden kann.

Bereits 1985 beschäftigte sich Fryer und Kniest [31] mit der Rekonstruktion von Tiefendaten mit einem SV System aus zwei Kameras durch die Wasseroberfläche. In der Abbildung 2.14 ist zu sehen, wie sie die Brechung an der Wasseroberfläche auf die Lichtstrahlen auf dem Weg von den beiden Kameras zu einem bestimmten Punkt auswirken. Ihr Ziel war es den Einfluss von Wellen, abhängig der Flughöhe, zwischen 50 m und 1500 m, auf den Fehler in den Tiefendaten zu untersuchen. Hierzu simulierten sie Wellen mit einer Wellenlänge von 25 m und einer Amplitude von 0,3 m, da dies die auf dem Ozean vorkommenden Wellen am besten beschreiben. Dabei stellten sie fest, dass der Fehler durch Wellen ab einer Flughöhe von 200 m zu vernachlässigen ist, da hier Fehler durch beispielsweise Kamerarauschen oder auf Grund von Ungenauigkeiten im System, deutlich überwiegen.

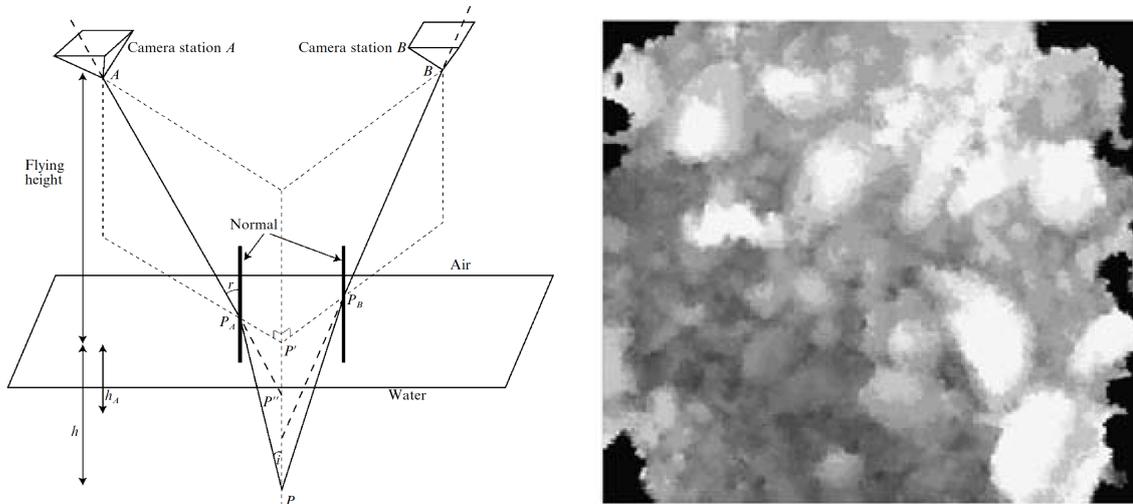


Abbildung 2.14: Links eine Skizze der Geometrie der Stereo Konfiguration von Butler et al. [23] und Fryer et al. [31]. Das rechte Bild ist eine von Butler et al. erstellte DEM durch 12 cm Wasser [23].

Ähnlich wie Smith et al. [82] beschäftigte sich auch Butler et al. [23] mit der 3D-Rekonstruktion des Bodens eines Flussbettes durch die Wasseroberfläche. Zielsetzung dieser Arbeit war das Erstellen eines DEM Bildes mit einer Auflösung von 3 mm, in Abbildung 2.14 rechts zu sehen, mit einem SV System und dabei den Einfluss der Wassertiefe auf die Genauigkeit zu beobachten. Diese Versuche wurden in einer kontrollierten Umgebung durchgeführt, die es ermöglichte sowohl Aufnahmen ohne Wasser anzufertigen, als auch den Wasserspiegel schrittweise zu erhöhen. Ebenfalls konnte somit der Einfluss von Wellen als Fehlerquelle ausgeschlossen werden. Unter Verwendung der Geometrie aus dem linken Bild der Abbildung 2.14, die auch schon Fryer und Kniest [31] verwendeten, waren die mittleren Fehler nach der Korrektur für 12 cm Wasser bei $-0,0035$ m, wobei hier der exakte Abstand zur Wasseroberfläche gemessen wurde. In einem zweiten Test wurde über Kontrollmarker nicht die Wasseroberfläche vermessen, sondern eine Markierung am Boden verwendet, hierbei wurde für 12 cm Wasser ein Fehler von $-0,0392$ m und bei einer Wasserhöhe von 25 cm ein Fehler von $-0,0726$ m ermittelt [23, S. 15, Tabelle II].

Palomer et al. [65] 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 LbSLS, 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. [65] 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 schaut und dort gedreht wird. Damit strahlt der Laser nicht immer senkrecht auf die Wasseroberfläche, dies ist für drei verschiedene Winkel in Abbildung 2.15 zu erkennen. Die eingezeichneten Winkel beziehen sich hierbei auf die Normale der Glasfläche. Links in der Abbildung 2.15, bei einem Winkel von 0° , trifft der Laserstrahl senkrecht auf die Oberfläche. In diesem speziellen Fall findet keine Brechung an der Schnittfläche der unterschiedlichen Medien

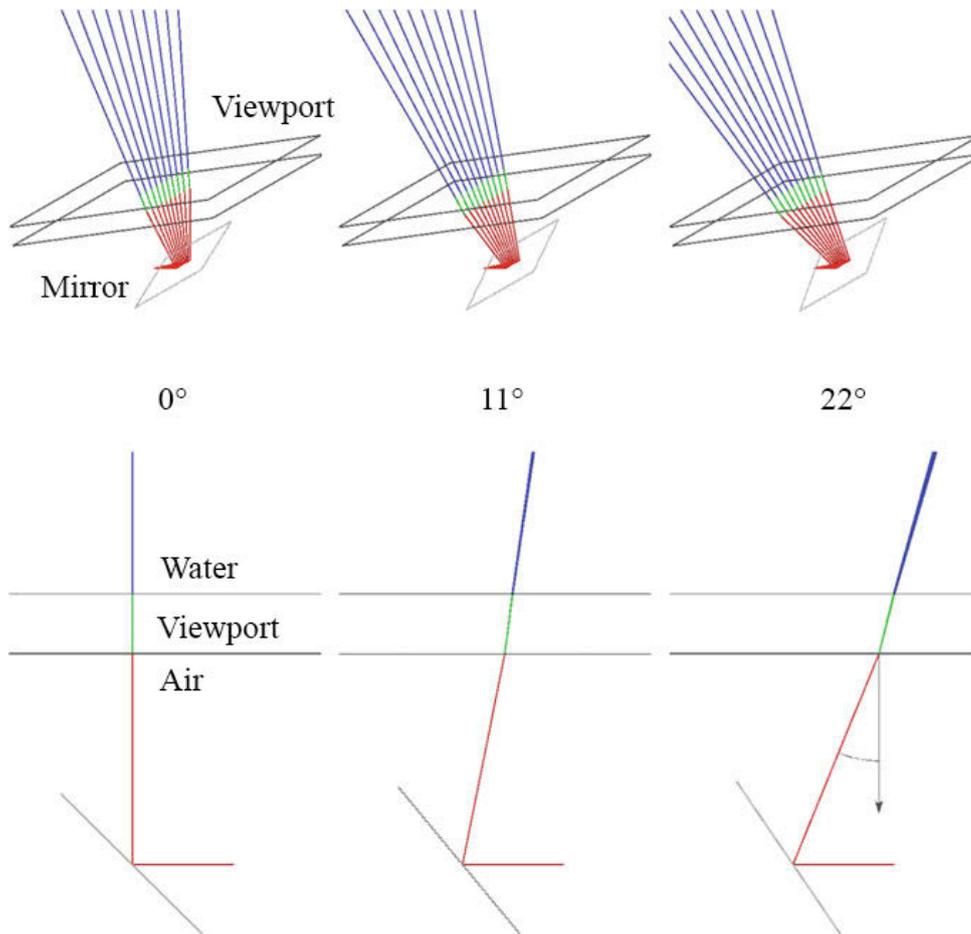


Abbildung 2.15: Die Abbildung zeigt den Einfluss des Eintrittswinkels auf den Austrittswinkel an der Grenze zwischen Wasser und Luft. Links entspricht der Einstrahlwinkel der Oberflächennormalen des Wassers. In der Mitte ist der Winkel 11° bezüglich der Normalen. Rechts wurde der Winkel auf 22° erhöht [65].

statt. Die mittlere Abbildung zeigt einen Einstrahlwinkel der um 11° von der Oberflächennormalen abweicht, ein Unterschied zwischen dem Eintritts- und Austrittswinkel ist deutlich zu erkennen. Im rechten Teil der Abbildung 2.15 wurde der Winkel auf 22° verdoppelt, auch hier ist eine deutliche Brechung des Laserstrahls zu erkennen. Es ist jedoch ebenfalls zu beobachten, dass der Austrittswinkel des Lichtstrahls stark vom Einfallswinkel abhängt. Da bei einem Linienlaser die Lichtstrahlen, aufgrund der geringen Distanz zur Wasseroberfläche, nicht parallel auf die Oberfläche treffen, sondern jeder Strahl einen anderen Einfallswinkel besitzt, variiert auch der Ausfallwinkel der Strahlen innerhalb der Linie, wenn diese nicht exakt senkrecht auf die Wasseroberfläche trifft. Palomer et al. [65] untersuchten diesen Effekt auf eine Linie ausgiebig in ihrer Arbeit und in Abbildung 2.16 ist dieser Effekt für eine Linie mit unterschiedlichen Einfallswinkeln aufgetragen. Um die Form der Linie möglichst gut beschreiben zu können, wählten Palomer et al. [65] einen elliptischen Kegel. Ein elliptischer Kegel lässt sich mathematisch als

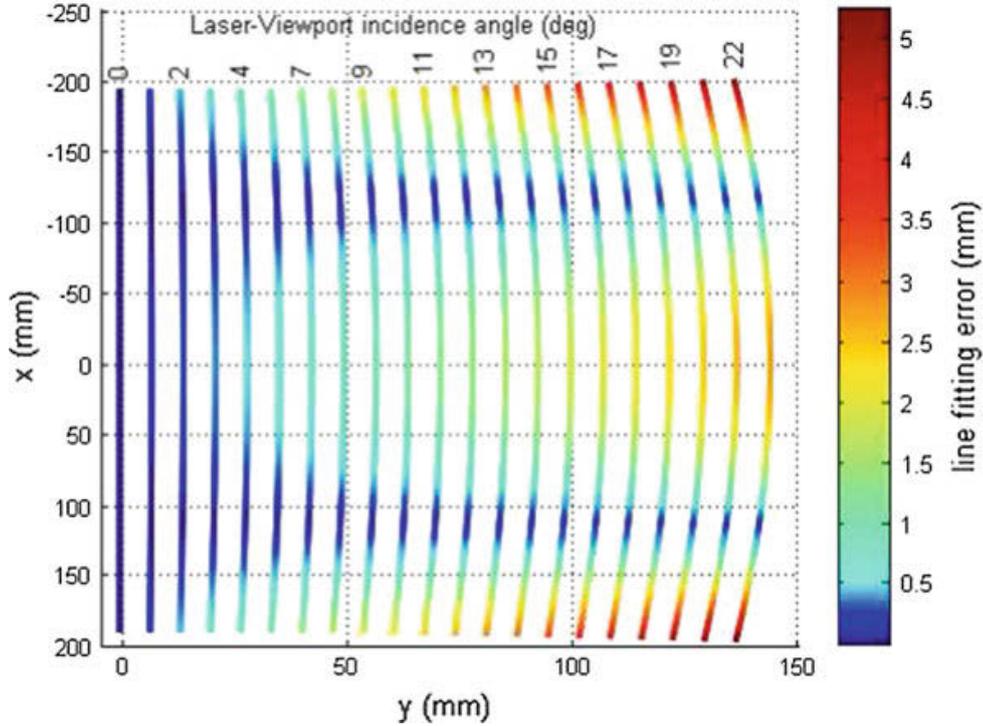


Abbildung 2.16: Die Abbildung trägt die entstehenden Fehler für eine Linie auf, die in unterschiedlichen Winkeln auf die Brechungsoberfläche auftrifft [65].

Oberfläche mit zwei Parametern, $\mathbf{c} = [h \ \beta]$, beschreiben. Dies lässt sich durch die Parameterform

$$\mathbf{f}(\mathbf{c}) = \begin{cases} x = ah \cos(\beta) \\ y = bh \sin(\beta) \\ z = h \end{cases} \quad (2.8)$$

darstellen. Wobei a und b die Verformung der Ellipse in x und y Richtung angeben. Da die Gleichung (2.8) jedoch lediglich einen Kegel, der auf der x, y Ebene mit der Höhe in Richtung z -Achse auf dem Ursprung steht, beschreibt, ist es notwendig sie um eine Transformation $\mathbf{t} = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ zu erweitern um den Kegel im gesamten 3D-Raum positionieren zu können. Dies ergibt die neue Gleichung

$$\mathbf{g}(\mathbf{c}, \mathbf{t}) = \mathbf{t} \oplus \mathbf{f}(\mathbf{c}) \quad (2.9)$$

die einen elliptischen Kegel an jeder Position im 3D-Raum beschreiben kann. Wobei \oplus die Transformation eines Punktes $p[x_p \ y_p \ z_p]^T$ mit $\mathbf{t} = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ beschreibt:

$$\mathbf{t} \oplus p = \mathbf{R}_z(\psi_t) \mathbf{R}_y(\theta_t) \mathbf{R}_x(\phi_t) \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{pmatrix}. \quad (2.10)$$

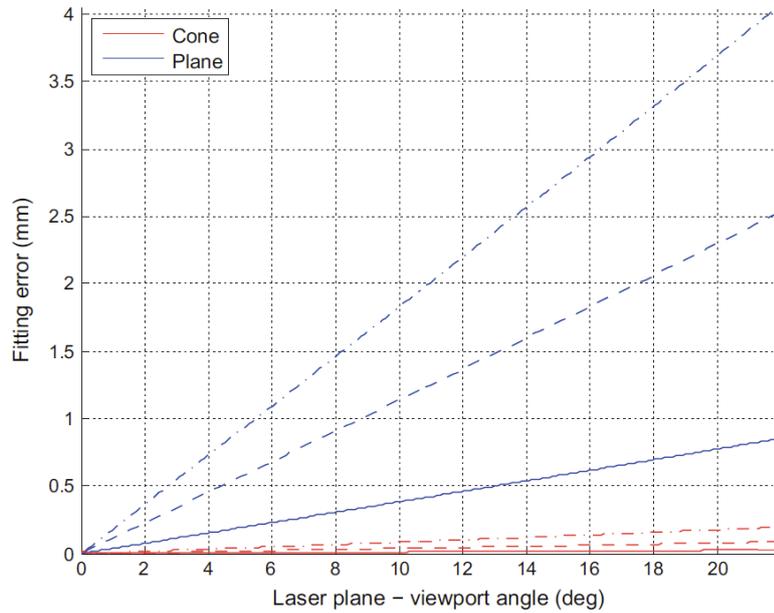


Abbildung 2.17: Die Abbildung trägt die Fehler auf, die zwischen der realen Linie und der mathematischen Repräsentation für die Verschiedenen Einstrahlwinkel entstehen. Dabei ist zu erkennen, dass sich die Linie, aufgrund der ungleichmäßigen Beugung an der Oberfläche, am besten durch einen elliptischen Kegel beschreiben lässt [65].

Hierbei bezeichnen \mathbf{R}_x , \mathbf{R}_y und \mathbf{R}_z die Rotationsmatrizen um die x , y und z Achsen mit den jeweiligen Winkeln ϕ , θ und ψ . Für eine Liste aus Punkten $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_n]$ und mit $d(\mathbf{g}(\mathbf{c}, \mathbf{t}), p)$ als minimalen Abstand zwischen dem Kegel $\mathbf{g}(\mathbf{c}, \mathbf{t})$ und dem Punkt p kann folgendes Problem mittels der Methode der kleinsten Quadrate minimiert werden:

$$[\mathbf{c}, \mathbf{t}] = \arg \min_{[\mathbf{c}, \mathbf{t}]} \sum_{i=1}^n d(\mathbf{g}(\mathbf{c}, \mathbf{t}), p_i). \quad (2.11)$$

Somit wird ein elliptischer Kegel, dessen halbe Grundfläche die Laserlinie möglichst genau beschreibt gefunden. Durch die Beschreibung der Linie durch einen solchen elliptischen Kegel, anstelle einer Geraden, konnte der Fehler, wie in der Abbildung 2.17 zu erkennen, deutlich verringert werden.

Kapitel 3

Theorie

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen dieser Arbeit erläutert. Zunächst wird beschrieben, wie das gesamte System, bestehend aus Kamera, Laser und Inertial Measurement Unit (IMU), kalibriert wird und die für die Rekonstruktion notwendigen Parameter bestimmt werden. Anschließend wird erklärt, nach welcher Methode die Laserlinien aus den Bildern extrahiert werden und wie daraus ein 3D-Modell rekonstruiert wird. Hierbei wird speziell auf das Problem, das beim Durchdringen der Wasseroberfläche entsteht, eingegangen.

3.1 Kamerakalibrierung

Da bei einem LbSLS die Kalibrierung der Kamera eine große Rolle spielt, werden im Folgenden die Grundlagen der Kamerakalibrierung mittels eines Lochkameramodells und der Kalibrierung nach Zhang [92] erklärt, die auch bei dem in dieser Arbeit verwendeten System zum Einsatz kommen.

3.1.1 Ideales Lochkameramodell

Die projektive Abbildung einer Kamera lässt sich in erster Näherung durch das Lochkameramodell bezeichnen. In der Abbildung 3.1 ist ein solches Modell zu sehen. Hierbei stellt C den Kameramittelpunkt und P den Bildmittelpunkt dar. Betrachtet man nun die Ebene auf der Z-Achse mit dem Abstand der Brennweite f zu C , auch Bildebene genannt, wird ein Punkt mit den Weltkoordinaten $\mathbf{X} = (X, Y, Z)^T$ auf die Stelle der Bildebene $\mathbf{x} = (x, y)$ abgebildet, an der die Gerade vom Kameramittelpunkt C die Bildebene schneidet. Der Punkt $(X, Y, Z)^T$ wird somit auf $(\frac{fX}{Z}, \frac{fY}{Z}, f)^T$ auf der Bildebene abgebildet. Lässt man nun die letzte Koordinate der Bildebene außen vor, so ergibt sich eine Abbildung von $\mathbb{R}^3 \mapsto \mathbb{R}^2$.

$$(X, Y, Z)^T \mapsto \left(\frac{fX}{Z}, \frac{fY}{Z}\right)^T \quad (3.1)$$

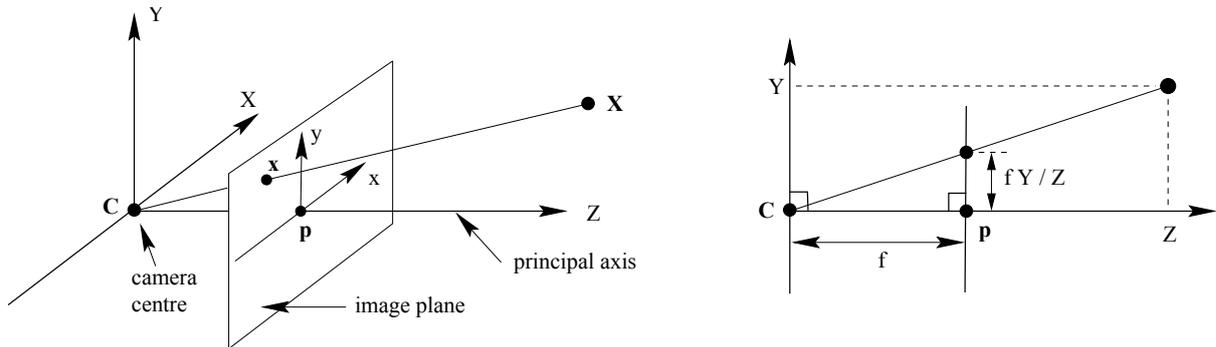


Abbildung 3.1: Lochkameramodell [35, S. 154].

Der Mittelpunkt der Projektion wird Kameramittelpunkt genannt und die senkrechte Gerade von diesem zur Bildebene Hauptachse oder optische Achse (*principal axis*). Der Punkt an dem die Hauptachse die Bildebene schneidet, wird als Bildmittelpunkt bezeichnet. Werden die Welt- und Bildkoordinaten nun als homogene Vektoren angesehen, so kann die Projektion aus (3.1) als Abbildung mit einer Matrixmultiplikation dargestellt werden:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} fX \\ fY \\ Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ & f & 0 \\ & & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3.2)$$

Die Gleichung (3.2) setzt nun aber voraus, dass der Bildmittelpunkt im Ursprung der Bildebene liegt, da dies jedoch in der Praxis nicht der Fall ist, muss daher die Abbildung folgendermaßen angepasst werden

$$(X, Y, Z)^T \mapsto \left(\frac{fX}{Z} + p_x, \frac{fY}{Z} + p_y \right)^T, \quad (3.3)$$

mit $(p_x, p_y)^T$ als Koordinaten für den Bildmittelpunkt. Werden dies nun auch wieder als homogene Koordinaten betrachtet, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} fX + Zp_x \\ fY + Zp_y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & p_x & 0 \\ & f & p_y & 0 \\ & & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Daraus ergibt sich nun die so genannte Kameramatrix A , die die intrinsischen Parameter enthält,

$$K = \begin{bmatrix} f & p_x & 0 \\ & f & p_y & 0 \\ & & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Diese wird später für die Kalibrierungen benötigt.

3.1.2 Lochkameramodell mit radialer und tangentialer Verzeichnung

Da Verzeichnungen einen großen Einfluss auf die Fehler im Bild haben, wird das ideale Lochkameramodell um radiale und tangentiale Verzeichnungsparameter erweitert.

Bei der radialen Verzeichnung handelt es sich um einen Effekt, der entsteht, wenn parallel eintreffende Lichtstrahlen nicht im selben Punkt konvergieren. Unter Wasser wird dieser Effekt auch durch eine Brechung des Wassers beeinflusst. Hierbei wird das eintreffende Licht rotationssymmetrisch um die optische Achse verzerrt. Hierbei gibt es zwei unterschiedliche Varianten, siehe auch Abbildung 3.2. Bei der kissenförmigen Verzeichnung werden Punkte, weiter vom optischen Zentrum entfernt projiziert. Werden die Punkte in Richtung des Bildmittelpunktes verschoben, wird von einer tonnenförmigen Verzeichnung gesprochen. Folgendes vereinfachtes Modell wird zur Beschreibung der radialen Verzeichnung verwendet:

$$\begin{aligned} x_{\text{corrected}} &= x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_{\text{corrected}} &= y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad , \end{aligned} \quad (3.6)$$

wobei r der Abstand zum Bildmittelpunkt ist.

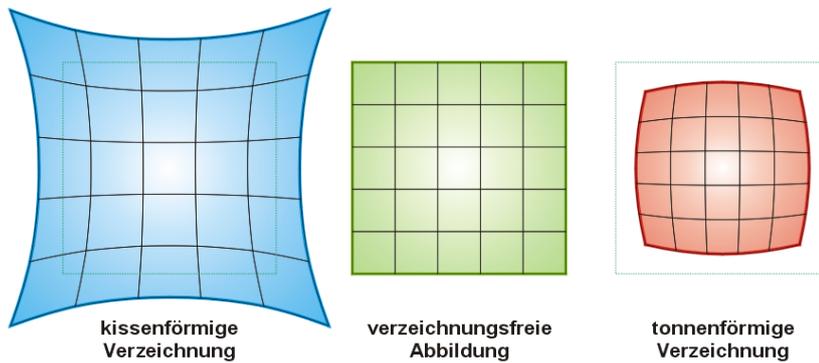


Abbildung 3.2: Radiale Verzeichnung [5].

Bei der tangentialen Verzeichnung werden die Punkte nicht radial um die optische Achse verzerrt, sondern entlang einer Tangente um das optische Zentrum. Dies kann beispielsweise auftreten, wenn Sensor und Linse nicht exakt parallel liegen. Hierbei kann sich, entgegen zur radialen Verzeichnung, der Richtungsvektor verändern. Für die meisten Kamerasysteme spielt dieser Fehler jedoch eine eher untergeordnete Rolle, da er meist sehr klein ist und somit kaum ins Gewicht fällt. Es lässt sich durch Anwendung folgender Gleichung korrigieren:

$$\begin{aligned} x_{\text{corrected}} &= x[2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\ y_{\text{corrected}} &= y[p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy] \quad . \end{aligned} \quad (3.7)$$

Die exakte Bestimmung dieser Parameter wird im nächsten Abschnitt im Zusammenhang mit der Kalibrierung erläutert.

3.1.3 Kalibrierung

Eines der populärsten Verfahren zur Kalibrierung von Kameras wurde von Zhengyou Zhang entwickelt [92]. Da dies in OpenCV implementiert ist und somit später in dieser Arbeit verwendet wird, werden hier die theoretischen Grundlagen dieses Verfahrens dargestellt.

Diese Methode benutzt als Grundlage das Modell der Lochkamera mit der Kameramatrix

$$A = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & u_0 \\ & f_y & v_0 \\ & & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

wobei γ die Verzerrung der beiden Bildachsen darstellt und der Gleichung

$$s\tilde{m} = A[R \ t]\tilde{M}, \quad (3.9)$$

für die Abbildung eines 3D Punktes \tilde{M} in Weltkoordinaten auf einen 2D Punkt \tilde{m} mit einem beliebigen Skalierungsfaktor s und (R, t) als die extrinsischen Parameter der Kamera. Im Folgenden wird $\tilde{m} = [u, v, 1]^T$ stets als Notation für die homogenen Koordinaten von $m = [u, v]^T$ verwendet. Nehmen wir nun an, dass die Objektebene auf $Z = 0$ des Weltkoordinatensystems liegt, so ergibt sich aus (3.9) mit r_i als i -te Spalte der Rotationsmatrix R

$$\begin{aligned} s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= A[r_1 \ r_2 \ r_3 \ t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= A[r_1 \ r_2 \ t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Da $Z = 0$ ist, gilt hier nun $M = [X, Y]^T$ und daher $\tilde{M} = [X, Y, 1]^T$. Damit wird ein Objektpunkt M nun durch die Homographie H auf den Punkt m abgebildet

$$s\tilde{m} = H\tilde{M} \quad \text{mit} \quad H = A[r_1 \ r_2 \ t]. \quad (3.11)$$

Existiert nun ein Bild der Objektebene, kann daraus die Homographie $H = [h_1 \ h_2 \ h_3]$ bestimmt werden. Mit der Gleichung (3.11) folgt daraus

$$[h_1 \ h_2 \ h_3] = \lambda A[r_1 \ r_2 \ t]$$

mit λ als beliebigen Skalierungsfaktor. Wird nun die Eigenschaft der Rotationsmatrix R verwendet, dass r_1 und r_2 orthonormal sind, ergibt sich daraus

$$h_1^T A^{-T} A^{-1} h_2 = 0 \quad (3.12)$$

$$h_1^T A^{-T} A^{-1} h_1 = h_2^T A^{-T} A^{-1} h_2 \quad . \quad (3.13)$$

Dies sind zwei grundlegende Beschränkungen für die, durch die intrinsischen Parameter, gegebene Homographie. Da die Homographie acht Freiheitsgrade besitzt und wir sechs extrinsische Parameter haben (drei für die Rotation und drei für die Translation), können daraus nur zwei Einschränkungen für die intrinsischen Parameter bestimmt werden.

Eine erste analytische Lösung für das Problem der Kalibrierung ist folgende: Nehmen wir an, dass

$$B = A^{-T} A^{-1} \equiv \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{f_x^2} & -\frac{\gamma}{f_x^2 f_y} & \frac{v_0 \gamma - u_0 f_y}{f_x^2 f_y} \\ -\frac{\gamma}{f_x^2 f_y} & \frac{\gamma^2}{f_x^2 f_y^2} + \frac{1}{f_y^2} & -\frac{\gamma(v_0 \gamma - u_0 f_y)}{f_x^2 f_y^2} - \frac{v_0}{f_y^2} \\ \frac{v_0 \gamma - u_0 f_y}{f_x^2 f_y} & -\frac{\gamma(v_0 \gamma - u_0 f_y)}{f_x^2 f_y^2} - \frac{v_0}{f_y^2} & \frac{(v_0 \gamma - u_0 f_y)^2}{f_x^2 f_y^2} + \frac{v_0^2}{f_y^2} + 1 \end{bmatrix} \quad .$$

Zu beachten ist hierbei, dass B symmetrisch ist und durch den 6D Vektor

$$b = [B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33}]^T \quad , \quad (3.15)$$

definiert ist. Wird nun der i -ten Spaltenvektor von H , $h_i = [h_{i1}, h_{i2}, h_{i3}]^T$, genommen, so ergibt sich

$$h_i^T B h_j = v_{ij}^T b \quad , \quad (3.16)$$

wobei

$$v_{ij} = [h_{i1} h_{j1}, h_{i1} h_{j2} + h_{i2} h_{j1}, h_{i2} h_{j2}, h_{i3} h_{j1} + h_{i1} h_{j3}, h_{i3} h_{j2} + h_{i2} h_{j3}, h_{i3} h_{j3}]^T$$

gilt. Mithilfe der beiden Gleichungen (3.12), (3.13) und dem Vektor b aus (3.15) kann dies, unter Beachtung der gegebenen Homographie, in folgende Form umgeschrieben werden

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{12})^T \end{bmatrix} b = 0 \quad . \quad (3.17)$$

Betrachtet man nun n Bilder der Objektebene, indem n mal die Gleichung (3.17) in einer Matrix zusammenfasst wird, so entsteht daraus eine Gleichung mit einer $2n \times 6$ Matrix V

$$Vb = 0 \quad . \quad (3.18)$$

Gilt $n = 1$, so können lediglich zwei der intrinsischen Parameter bestimmt werden, die Restlichen müssen vorher bekannt sein oder passend geschätzt werden. Um eine Lösung für $n = 2$ zu

bestimmen, kann zusätzlich gefordert werden, dass $\gamma = 0$ gelten muss. Für alle $n \geq 3$ kann, bis auf einen Skalierungsfaktor, eine eindeutige Lösung berechnet werden. Diese ist der Eigenvektor von $V^T V$ mit dem kleinsten Eigenwert. Damit lässt sich nun die Matrix B aufstellen und daraus alle für A benötigten Werte berechnen.

Mit (3.14) kann

$$\begin{aligned}
v_0 &= (B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}) / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2) \\
\lambda &= B_{33} - [B_{13}^2 + v_0(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})] / B_{11} \\
f_x &= \sqrt{\lambda / B_{11}} \\
f_y &= \sqrt{\lambda B_{11} / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2)} \\
\gamma &= B_{12}f_x^2 f_y / \lambda \\
u_0 &= \gamma v_0 / f_y - B_{13}f_x^2 / \lambda
\end{aligned} \tag{3.19}$$

gewonnen werden und daraus lassen sich nun, mithilfe vom (3.11), die extrinsischen Parameter bestimmen

$$\begin{aligned}
r_1 &= \lambda A^{-1} h_1 \\
r_2 &= \lambda A^{-1} h_2 \\
r_3 &= r_1 \times r_2 \\
t &= \lambda A^{-1} h_3
\end{aligned} \tag{3.20}$$

dabei gilt $\lambda = 1 / \|A^{-1} h_1\| = 1 / \|A^{-1} h_2\|$.

Eine andere Möglichkeit, dieses Problem zu lösen, ist eine nichtlineare Optimierungstechnik auf Basis der Maximum-Likelihood-Methode zu verwenden. Da die analytische Lösung sich der Minimierung des algebraischen Abstands bedient, dies aber keinerlei physikalische Bedeutung besitzt, lässt sich dies durch Minimierung des Rückprojektionsfehlers verbessern.

Hat man nun n Bilder der Objektebene mit m Punkten, von denen einige durch Rauschen beschädigt sein können, muss hierzu folgende Funktion minimiert werden:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|m_{ij} - \hat{m}(A, R_i, t_i, M_j)\|^2 \tag{3.21}$$

Hierbei stellt $\hat{m}(A, R_i, t_i, M_j)$ die Abbildung des Punktes M_j im Bild i (vgl. (3.11)) dar. R bezeichnet die Rotation, als einen Vektor mit drei Parametern r . Dieser ist parallel zur Rotationsachse und der Winkel wird durch dessen Länge repräsentiert. Da es sich bei der Minimierung um ein nichtlineares Problem handelt, wird dies mit dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus gelöst. Für diesen ist es notwendig, eine initiale Schätzung für A und $\{R_i, t_i | i = 1..n\}$ zu bestimmen. Dies kann zum Beispiel über das vorher beschriebene analytische Verfahren geschehen.

Bisher wurde die Verzeichnung durch die Linse der Kamera völlig vernachlässigt, da dies jedoch ein Faktor ist, der für gewöhnlich nicht zu vernachlässigen ist, gilt es nun, diesen noch in das

bereits beschriebene System zu integrieren.

Nehmen wir hierzu (u, v) als die optimalen, nicht verzeichneten Bildkoordinaten und (\check{u}, \check{v}) die entsprechenden Bildkoordinaten mit Verzeichnung. Nun können, mit (x, y) als nicht verzeichnete und (\check{x}, \check{y}) als verzeichnete normalisierte Bildkoordinaten, sowie k_1 und k_2 als Koeffizienten der Verzeichnung, die Gleichungen

$$\begin{aligned}\check{x} &= x + x[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \\ \check{y} &= y + y[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2]\end{aligned}$$

beschrieben werden. Wird nun weiter angenommen, dass der Mittelpunkt der Verzeichnung auf dem Bildmittelpunkt liegt und $\gamma = 0$ gilt, so können mit $\check{u} = u_0 + f_x \check{x} + \gamma \check{y}$ und mit $\check{v} = v_0 + f_y \check{y}$ folgende Gleichungen aufgestellt werden

$$\begin{aligned}\check{u} &= u + (u - u_0)[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \\ \check{v} &= v + (v - v_0)[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2]\end{aligned} \quad (3.22)$$

Ist zu erwarten, dass die Verzeichnung nur sehr gering ist, kann diese auch ignoriert werden und eine Kalibrierung nur über eine Schätzung der anderen fünf intrinsischen Parameter durchgeführt werden. Eine weitere Möglichkeit ist es, erst alle anderen Parameter zu schätzen und daraus k_1 und k_2 zu bestimmen, um damit die optimalen Koordinaten (u, v) zu bestimmen. Mithilfe der Gleichungen (3.22) können nun zwei neue Gleichungen für jeden Punkt jedes Bildes aufgestellt werden

$$\begin{bmatrix} (u - u_0)(x^2 + y^2) & (u - u_0)(x^2 + y^2)^2 \\ (v - v_0)(x^2 + y^2) & (v - v_0)(x^2 + y^2)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \check{u} - u \\ \check{v} - v \end{bmatrix} .$$

Werden nun wieder alle m Punkte der n Bilder genommen, kann aus den daraus entstehenden Gleichungen eine Matrix der Form $Dk = d$ mit $k = [k_1, k_2]^T$ erstellt werden. Eine lineare Lösung hierfür ist gegeben durch

$$k = (D^T D)^{-1} D^T d \quad (3.23)$$

Wurde k_1 und k_2 so bestimmt, können mit der Gleichung (3.21), in dem $\hat{m}(A, R_i, t_i, M_j)$ durch (3.22) ersetzt wird, die übrigen Werte berechnet werden.

Da dies jedoch eine sehr hohe Laufzeit hat, werden die Parameter der Verzerrung der Gleichung (3.21) hinzugefügt. Dadurch wird folgende Gleichung erhalten, die es zu minimieren gilt:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|m_{ij} - \hat{m}(A, k_1, k_2, R_i, t_i, M_j)\|^2 \quad (3.24)$$

Auch hierbei ist $\hat{m}(A, k_1, k_2, R_i, t_i, M_j)$ die Abbildung des Punktes M_j im Bild i mit der Verzeichnung aus (3.22). Wie in (3.21) handelt es sich hierbei um ein nichtlineares Problem und daher wird auch hier, zur Lösung der Gleichung, der Levenberg-Marquardt-Algorithmus eingesetzt. Die benötigte initiale Schätzung von k_1 , k_2 , A und $\{R_i, t_i | i = 1..n\}$ geschieht genau wie bereits vorher beschrieben.

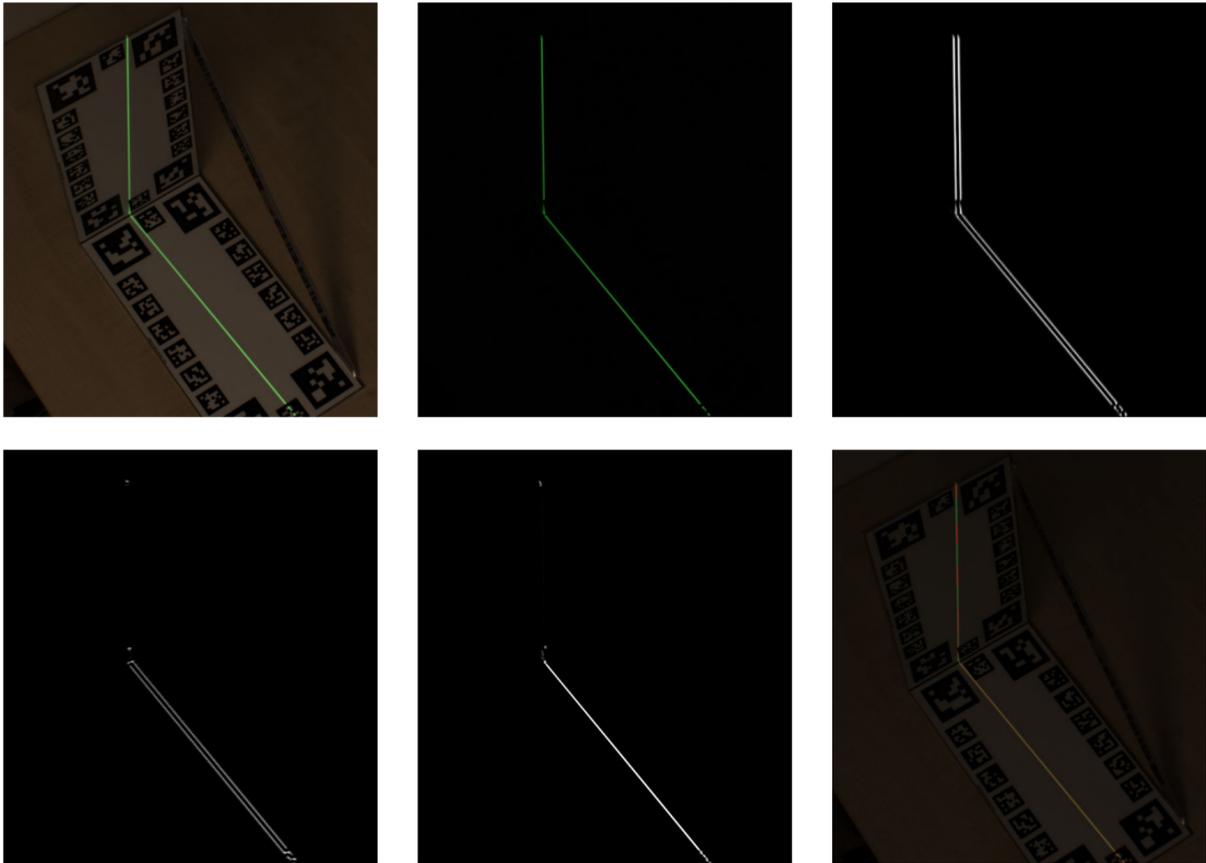


Abbildung 3.3: Die Abbildung zeigt das Ergebnis der Linienextraktion. Links oben befindet sich das Ausgangsbild, rechts folgen die Bilder nach der Hintergrundsubtraktion und für r_{xx} . Links unten nach rechts unten befinden sich die Bilder für r_{yy} , r_{xy} und zuletzt die detektierten Punkte.

Da die von Zhang entwickelte Methode nur für planare Kalibriermuster geeignet ist, muss für eine 3D-Struktur eine initiale Schätzung der Parameter mithilfe einer, in einer Ebene liegenden, Teilmenge der Kalibrierpunkte vorgenommen werden. Mit dieser Schätzung kann daraufhin die Gleichung (3.24) mit den gesamten 3D-Punkten der Struktur verwendet werden, um die initiale Schätzung zu optimieren.

3.2 Linienerkennung

Die Erkennung und Extraktion der Linie ist ein wichtiger Bestandteil für die 3D-Rekonstruktion mit einem SL System. Die Genauigkeit der Erkennung der Linie im Bild hat einen sehr großen Einfluss auf die Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion. Ebenfalls hat die Laufzeit der Implementierung der Detektierung einen hohen Einfluss auf die Gesamtlaufzeit der Rekonstruktion, da es sich hierbei um den aufwändigsten Teil handelt.

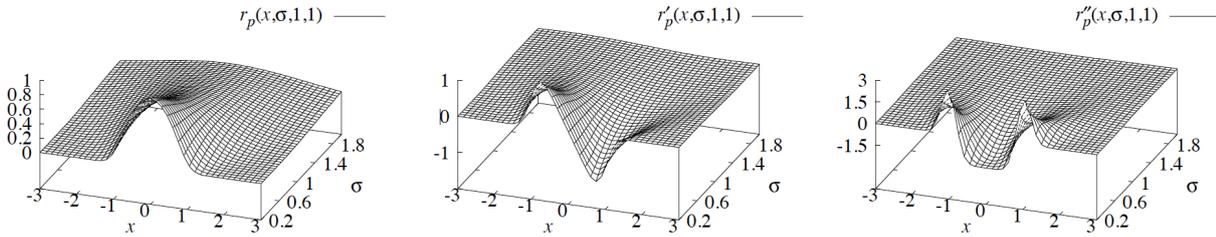


Abbildung 3.4: Die Abbildungen zeigen das Linienprofil f_p nach der Faltung mit den Ableitungen des Gaußschen Filters für $x \in [-3, 3]$ und $\sigma \in [0.2, 2]$ [84].

Ein sehr robuster und genauer Algorithmus zur Extraktion der Linien, der auch in dieser Arbeit verwendet wird, wurde von Steger [84] entwickelt. Zwar hat der Algorithmus von Steger eine etwas schlechtere Laufzeit als vergleichbare andere Ansätze, jedoch zeichnet er sich durch eine hohe Flexibilität, Robustheit und Qualität aus.

Zunächst ist es notwendig, das 1D Profil der Linie zu beschreiben, um dies anschließend im Bild zu lokalisieren. Für eine ideale Linie mit der Breite $2w$ und der Höhe h lässt sich dies durch die Funktion

$$f_b(x) = \begin{cases} h, & |x| \leq w \\ 0, & |x| > w \end{cases} \quad (3.25)$$

beschreiben. Aufgrund der verwendeten Techniken von Kamerasensoren, ist diese Beschreibung in der Realität jedoch nicht anzutreffen. Daher gilt es die Gleichung (3.25) wie folgt zu erweitern:

$$f_p(x) = \begin{cases} h(1 - (x/w)^2), & |x| \leq w \\ 0, & |x| > w \end{cases} \quad (3.26)$$

Soll nun eine Linie mit dem durch (3.26) gegebenen Profil in einem Bild $z(x)$ gefunden werden, ist es notwendig, die Stellen zu finden, an denen $z'(x)$ Null wird. Ein weiteres Kriterium zur Beschränkung der Linie ist hierbei die zweite Ableitung $z''(x)$ an der Stelle $z'(x) = 0$. Handelt es sich um eine helle Linie auf einem dunklen Hintergrund, so gilt $z''(x) \ll 0$, gilt jedoch $z''(x) \gg 0$, so ist es eine dunkle Linie auf einem hellen Hintergrund. Dabei ist zu beachten, dass für ein ideales Linienprofil für alle $|x| \leq w$ $f_p''(x) = -2h/w^2$ gilt.

Da reale Bilder jedoch meist ein gewisses Rauschen aufweisen, ist dieses Vorgehen ohne weitere Anpassungen möglich. Die beiden Ableitungen $z'(x)$ und $z''(x)$ müssen in diesem Fall durch eine Faltung der Bilder mit den Ableitungen des Gaußschen Weichzeichners bestimmt werden. Die

Ableitungen des verwendeten Gaußschen Filters sind hierbei gegeben durch folgende Gleichungen:

$$g_\sigma(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (3.27)$$

$$g'_\sigma(x) = \frac{-x}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (3.28)$$

$$g''_\sigma(x) = \frac{x^2 - \sigma^2}{\sqrt{2\pi}\sigma^5} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}. \quad (3.29)$$

Hierdurch ergeben sich nun folgende Gleichungen

$$r_p(x, \sigma, w, h) = g_\sigma(x) * f_p(x) \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{h}{w^2} ((w^2 - x^2 - \sigma^2)(\phi_\sigma(x+w) - \phi_\sigma(x-w)) - \\ &\quad 2\sigma^2 x(g_\sigma(x+w) - g_\sigma(x-w)) - \\ &\quad \sigma^4(g'_\sigma(x+w) - g'_\sigma(x-w))) \end{aligned}$$

$$r'_p(x, \sigma, w, h) = g'_\sigma(x) * f_p(x) \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{h}{w^2} (-2x(\phi_\sigma(x+w) - \phi_\sigma(x-w)) + \\ &\quad (w^2 - x^2 - 3\sigma^3)(g_\sigma(x+w) - g_\sigma(x-w)) - \\ &\quad 2\sigma^2 x(g'_\sigma(x+w) - g'_\sigma(x-w)) - \\ &\quad \sigma^4(g''_\sigma(x+w) - g''_\sigma(x-w))) \end{aligned}$$

$$r''_p(x, \sigma, w, h) = g''_\sigma(x) * f_p(x) \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{h}{w^2} (-x(\phi_\sigma(x+w) - \phi_\sigma(x-w)) + \\ &\quad 4x(g_\sigma(x+w) - g_\sigma(x-w)) + \\ &\quad (w^2 - x^2 - 5\sigma^2)(g'_\sigma(x+w) - g'_\sigma(x-w)) - \\ &\quad 2\sigma^2 x(g''_\sigma(x+w) - g''_\sigma(x-w)) - \\ &\quad \sigma^4(g'''_\sigma(x+w) - g'''_\sigma(x-w))) \end{aligned}$$

wobei

$$\phi_\sigma(x) = \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt \quad (3.33)$$

gilt. Mit diesen Gleichungen lässt sich nun genau beschreiben, wie das Profil der Linie f_p nach der Faltung mit den Gaußschen Filtern aussieht. In der Abbildung 3.4 ist das Ergebnis für eine ideale, helle, Linie mit $w = 1$ und $h = 1$, auf dunklem Untergrund, für $x \in [-3, 3]$ und $\sigma \in [0, 2, 2]$ zu sehen. Weiter ist zu erkennen, dass $r'_p(x, \sigma, w, h) = 0$ für alle σ genau dann, wenn $x = 0$ ist und das Minimum von $r''_p(x, \sigma, w, h) = 0$ für alle σ ebenfalls bei $x = 0$ liegt. Somit lässt sich die Position der Linie für alle σ präzise bestimmen. Aufgrund der angewendeten Glättung der Bilder, ist zu beobachten, dass für große σ die Funktionen abflachen. Daher ist es notwendig,

im Algorithmus den Schwellwert zur Erkennung der Linien angepasst werden muss, falls große Werte für σ verwendet werden.

Lineare 2D Strukturen, lassen sich nun als Kurve $s(t)$ darstellen, die das 1D Linienprofil, f_p , erweitern. Die Senkrechte zur Ableitung $s'(t)$ sei im Folgenden $n(t)$. Hierbei gilt, dass die erste Ableitung von $n(t)$ Null wird und der Betrag der zweiten Ableitung einen großen Wert ergibt. Um die Richtung, in die die Linie von jedem einzelnen Punkt fortgesetzt wird, zu bestimmen, müssen die partiellen Ableitungen von r_x , r_y , r_{xx} , r_{xy} und r_{yy} berechnet werden. Dies geschieht mithilfe einer Erweiterung des Gaußschen Filters aus den Gleichungen (3.27) - (3.29):

$$g_{x,\sigma}(x, y) = g_\sigma(y)g'_\sigma(x) \quad (3.34)$$

$$g_{y,\sigma}(x, y) = g'_\sigma(y)g_\sigma(x) \quad (3.35)$$

$$g_{xx,\sigma}(x, y) = g_\sigma(y)g''_\sigma(x) \quad (3.36)$$

$$g_{xy,\sigma}(x, y) = g'_\sigma(y)g'_\sigma(x) \quad (3.37)$$

$$g_{yy,\sigma}(x, y) = g''_\sigma(y)g_\sigma(x) \quad (3.38)$$

Weiter werden nun die Eigenwerte und Eigenvektoren der Hesse-Matrix

$$H(x, y) = \begin{pmatrix} p_{xx} & p_{xy} \\ p_{xy} & p_{yy} \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

berechnet. Der Eigenvektor, gehörend zu dem größten Betrag des Eigenwertes, beschreibt nun die Richtung $n(t)$. Die Lage des Punktes P entlang von n wird, mittels einer Taylor-Expansion, deren Extremwerte durch

$$(p_x, p_y) = (tn_x, tn_y) \quad (3.40)$$

gegeben sind, mit

$$t = -\frac{r_x n_x + r_y n_y}{r_{xx} n_x^2 + 2r_{xy} n_x n_y + r_{yy} n_y^2} \quad (3.41)$$

berechnet. Es gilt zu beachten, dass $(p_x, p_y) \in [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}] \times [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$ gelten muss, um einen Punkt auf der Linie zu bestimmen. Der so, mit Subpixelgenauigkeit, gefundene Punkt ist nur ein gültiger Punkt, wenn der absolute Wert des größten Eigenwertes groß ist. Zuletzt werden alle extrahierten Punkte, entsprechend der bestimmten Richtung zu einer Linie zusammengefügt, um ein Set aus Punkten zu erhalten, das je eine zusammenhängende Linie repräsentiert. Die Ergebnisse der einzelnen Schritte sind der Abbildung 3.3 zu entnehmen.

3.3 Snelliussches Brechungsgesetz

Das Snelliussche Brechungsgesetz, benannt nach dem Mathematiker Willenbrord van Roijen Snell, beschreibt die Richtungsänderung einer ebenen Welle an der Grenzfläche beim Wechsel in ein anderes Medium. Als Ursache für die, als Brechung bezeichnete, Richtungsänderung ist die

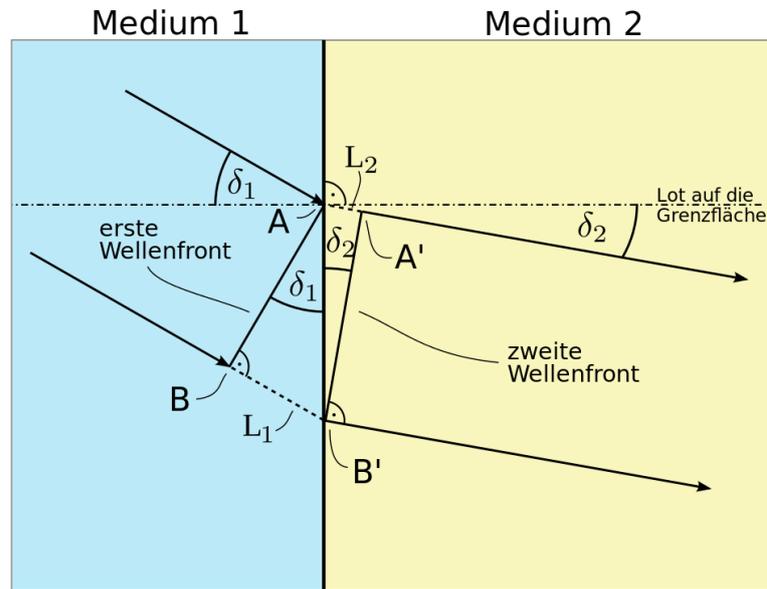


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des Snelliusschen Brechungsgesetzes [7].

unterschiedliche Phasengeschwindigkeit der Trägermedien. Diese Änderung der Geschwindigkeit wird im Snelliusschen Brechungsgesetz als Brechungsindex bezeichnet.

Mit dem Brechungsindex n eines bestimmten Mediums, wird die Veränderung der Phasengeschwindigkeit c und der Wellenlänge λ bezüglich des Vakuums, angegeben. Somit gilt

$$n = \frac{c}{c_{\text{Medium}}} = \frac{\lambda}{\lambda_{\text{Medium}}} \quad (3.42)$$

für den Brechungsindex. Für Licht im Medium Luft beträgt der Brechungsindex beispielsweise $n = 1$, wohingegen in Wasser ca. $n = 1,3$ gilt.

Mit n_1 und n_2 als Brechungsindex der beiden Medien, kann der Ausfallswinkel δ_2 bezüglich des Einfallswinkels δ_1 eines Lichtstrahls beim Auftreffen auf die Grenzfläche wie folgt beschrieben werden:

$$n_1 \sin(\delta_1) = n_2 \sin(\delta_2) \quad (3.43)$$

Dies lässt sich aus der Abbildung 3.5 in wenigen Schritten herleiten. Zunächst ist festzustellen, dass die Winkel δ_1 bzw. δ_2 zwischen dem Lot der Grenzfläche jeweils mit Winkel zwischen der Grenzfläche und der ersten bzw. zweiten Wellenfront übereinstimmen. Wird nun je ein Dreieck mit L_1 bzw. L_2 als Gegenkathete und der Grenzfläche als Hypotenuse mit der Länge $|AB'|$ aufgespannt, so ergibt sich Folgendes:

$$\sin(\delta_1) = \frac{L_1}{|AB'|} \quad (3.44)$$

$$\sin(\delta_2) = \frac{L_2}{|AB'|} \quad (3.45)$$

Durch Umstellen und Gleichsetzen nach $|AB'|$ ergibt sich

$$\frac{\sin \delta_1}{\sin \delta_2} = \frac{L_1}{L_2} \quad , \quad (3.46)$$

dies lässt sich mit der zusätzlichen Eigenschaft, dass L_2 um den Stauchungsfaktor n_1/n_2 kürzer ist als L_1 , weiter umstellen zu

$$\frac{\sin \delta_1}{\sin \delta_2} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (3.47)$$

was mit dem Brechungsgesetz (3.43) äquivalent ist.

Ein besonderer Fall tritt für $n_1 > n_2$ und genügend große δ_1 ein, hierbei gilt

$$\sin \delta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \delta_1 > 1 \quad . \quad (3.48)$$

Dies ist jedoch für kein reelles δ_2 lösbar und in diesem Fall kommt es zu einer sogenannten Totalreflexion, bei der das Licht von der Grenzfläche vollständig reflektiert wird. Der Winkel δ_g , der den Grenzwinkel der Totalreflexion beschreibt, lässt sich daher wie folgt beschreiben:

$$\sin \delta_g = \frac{n_2}{n_1} \quad . \quad (3.49)$$

3.4 Laserkalibrierung

Bei der Kalibrierung der Parameter der Laserprojektoren ist das Ziel, für jeden Linienlaser eine Ebenengleichung zu bestimmen, die die Lichtebene des Lasers bezüglich der Kamera beschreibt. Hierzu wird ein 3D-Kalibriermuster in L-Form verwendet, zu sehen in der Abbildung 3.6, das mit *AprilTags* [63] versehen wurde. Dies bietet die Möglichkeit, die beiden Ebenen der Kalibrierstruktur zuverlässig zu erkennen und, wie in Abschnitt 3.1.3 beschrieben, die extrinsischen Parameter $\{r_1, r_2, r_3, t\}$, siehe (3.20), der Kamera zu bestimmen. Anschließend kann mit deren Hilfe die Ebene der Laserlinien bestimmt werden.

Da das Kalibriermuster aus zwei Ebenen besteht, gilt es hierfür zunächst zwei Ebenengleichungen E_{K_1} und E_{K_2} der Form

$$E : ax + by + cz = 1 \quad (3.50)$$

aufzustellen. Dies geschieht mithilfe der extrinsischen Parameter und der auf dem Muster angebrachten AprilTags, deren Position zueinander im Voraus bekannt ist. Im nächsten Schritt werden die Punkte der projizierten Laserlinie aus dem Bildbereich des Kalibrierusters, mittels des in Abschnitt 3.2 beschriebenen Verfahrens, extrahiert. Somit ist nun für jeden Punkt P_i die verzeichnete Bildkoordinate $(\check{x}_i, \check{y}_i)$ bekannt. Mittels des Lochkameramodells und des in Abschnitt 3.1.3 und Gleichung (3.22) erklärten Verfahrens, können aus diesen $(\check{x}_i, \check{y}_i)$ für alle P_i die nicht

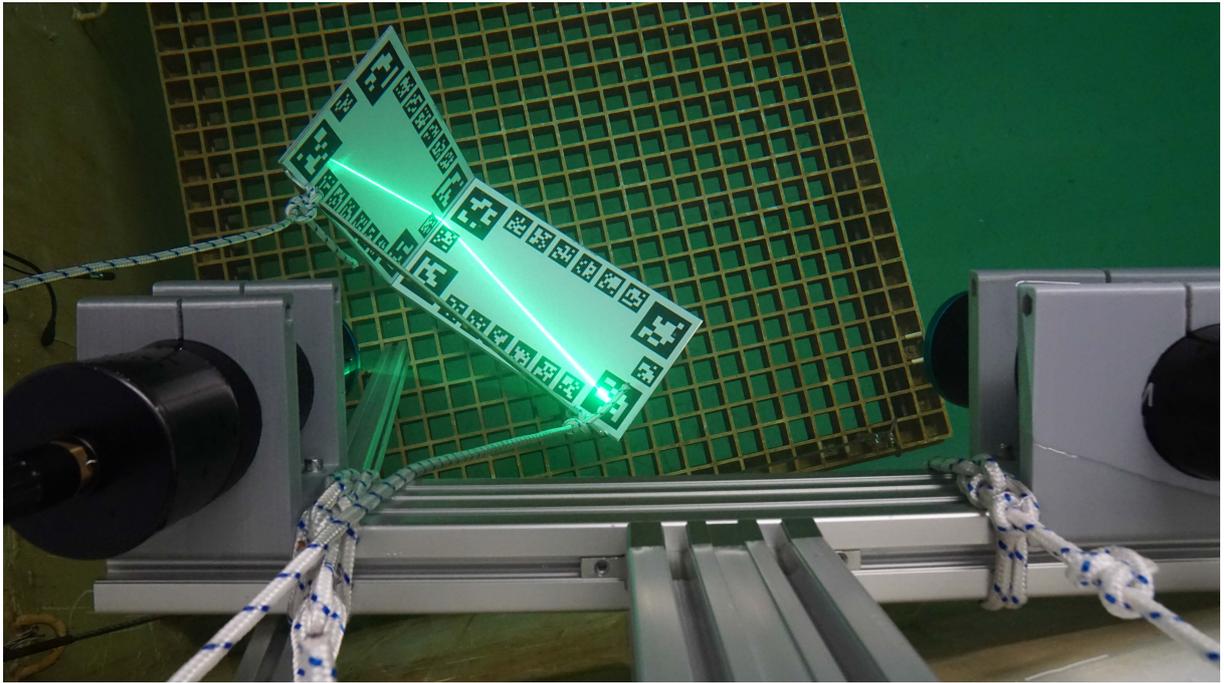


Abbildung 3.6: Die Laserlinie auf dem L-Kalibriermuster, das für die Kalibrierung der Laserlinie verwendet wird.

verzeichneten normalisierten Koordinaten (x_i, y_i) bestimmt werden. Somit ist es möglich, für jeden Punkt P_i eine Gerade

$$g_i = \lambda_i \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3.51)$$

zu erstellen, die vom Ursprung des Kamerakoordinatensystems durch den erkannten Punkt P_i auf der Bildebene verläuft und sich an einem Punkt L_i mit der Ebene E_{K_1} oder E_{K_2} des L-förmigen Kalibrierungsmusters schneidet. Um den Schnittpunkt L_i und somit die Weltkoordinaten des erkannten Laserlinienpunktes P_i zu berechnen, wird nun zunächst (3.51) in die Ebenengleichung (3.50) eingesetzt:

$$a(\lambda_i x_i) + b(\lambda_i y_i) + c\lambda_i - 1 = 0 \quad . \quad (3.52)$$

Wird dies nun nach λ_i aufgelöst und dies wiederum in die Gerade (3.51) eingesetzt, können alle Parameter des Punktes $L_i = (X_i, Y_i, Z_i)^T$ bestimmt werden.

Das Bestimmen der Parameter a, b, c , der Ebene E_L , in der alle extrahierten Punkte L_i liegen, ist nun ein Problem, das sich über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate mithilfe einer Singulärwertzerlegung (SVD) lösen lässt [83].

3.5 Rekonstruktion

Für die Rekonstruktion der 3D-Informationen aus den, mit der Kamera, aufgezeichneten Bildern, sind mehrere Schritte notwendig. Zunächst müssen, wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, die Ebenen der beiden Laserlinien bezüglich der Kamera bestimmt werden. Anschließend wird jedes einzelne Bild betrachtet und mittels 3.2 die einzelnen Punkte der Laserlinie extrahiert. Aus diesen Punkten lassen sich nun, gemeinsam mit den Laserebenen, die 3D-Informationen rekonstruieren. Im Folgenden wird dieses Vorgehen zunächst für den Fall erklärt, dass sich Scanner und Zielobjekt im gleichen Medium befinden. Daraufhin wird dieses Modell erweitert, um die auftretenden Probleme bei einem Wechsel des Mediums zu modellieren.

3.5.1 Rekonstruktion durch Lichtschnittverfahren

Die grundlegende Idee der 3D-Rekonstruktion ist es, die projizierte Laserlinie als eine Ebene E_L zu betrachten. Die Oberfläche der zu rekonstruierenden Objekte entsprechen somit den Schnittpunkten zwischen dieser Ebene und den Objekten. Diese Schnittpunkte sind in den Kamerabildern in Form der Laserlinie sichtbar. Um die 3D-Weltkoordinaten dieser Schnittpunkte und somit die einzelnen Punkte der betrachteten Oberfläche zu bestimmen, wird die Lage der Laserebene E_L bezüglich der Kamera nach Abschnitt 3.4 bestimmt. Weiter wird die projizierte Laserlinie mittels der Methode von Steger 3.2 extrahiert. Danach werden alle Bildpunkte anhand der Verzerrungsparameter der Kamera entzerrt. Hierdurch vereinfachen sich die folgenden Gleichungen, da die Verzerrung nicht mehr berücksichtigt werden muss.

Mithilfe der in Kameramatrix (3.8) lässt sich die Gleichung der Laserebene (3.50) zu folgender Gleichung umstellen:

$$E_L : a \left(\frac{x - u_0}{f_x} \right) + b \left(\frac{y - v_0}{f_y} \right) + c = -\frac{1}{z} \quad . \quad (3.53)$$

Sind die Parameter (a, b, c) der Laserebene bekannt, kann somit für jeden 2D-Bildpunkt (x_i, y_i) der entsprechende 3D-Punkt (X_i, Y_i, Z_i) bezüglich des Kamerakoordinatensystems wie folgt bestimmt werden:

$$Z_i = -\frac{1}{a \left(\frac{x - u_0}{f_x} \right) + b \left(\frac{y - v_0}{f_y} \right) + c} \quad (3.54)$$

$$X_i = Z_i \frac{x - u_0}{f_x} \quad (3.55)$$

$$Y_i = Z_i \frac{y - v_0}{f_y} \quad , \quad (3.56)$$

wobei angenommen werden kann, dass die Z -Achse positiv ist, da die Punkte in positiver Richtung vor der Kamera liegen müssen.

Wurden für jedes Bild alle Punkte rekonstruiert, ist es möglich, sie durch die entsprechende Transformation, die die Bewegung des Scanners zwischen den einzelnen Bildern repräsentiert, zu

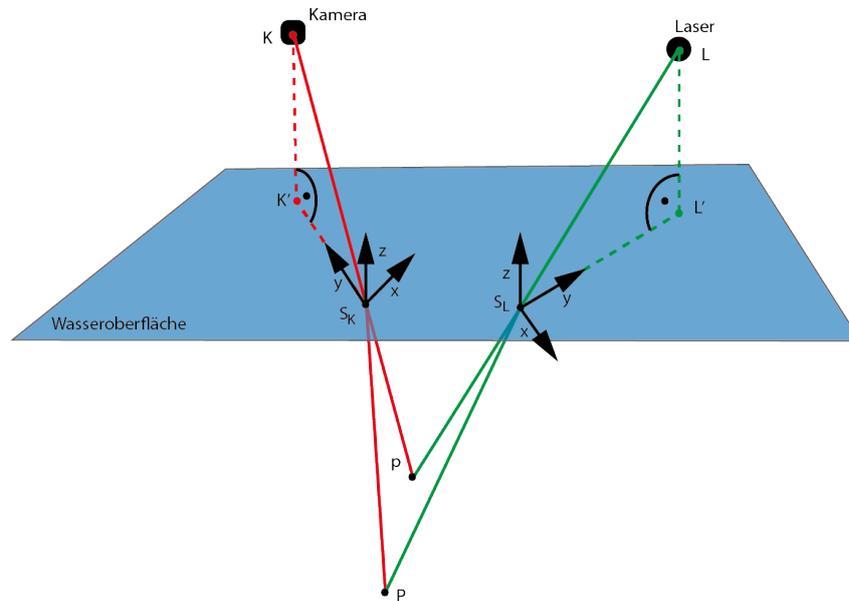


Abbildung 3.7: Die Abbildung stellt die Rekonstruktion schematisch dar. Links oben befindet sich die Kamera, deren Kamerastrahl in Rot dargestellt ist. Rechts oben befindet sich der Laser, dessen Strahl in Grün dargestellt ist. Beide durchdringen die Wasseroberfläche in unterschiedlichen Winkeln. Der nicht korrigierte Punkte p ist der Schnittpunkt dieser beiden Geraden unterhalb der Wasseroberfläche. Um die Brechung zu korrigieren wird für jeden der beiden Strahlen ein neues Koordinatensystem gewählt, so dass die zu Korrektur der Brechung benötigte Drehung, einer Drehung um die jeweilige x -Achse entspricht. Diese beiden Koordinatensysteme sind jeweils am Schnittpunkt zwischen den Geraden und der Wasseroberfläche eingezeichnet. Nachdem die beiden Geraden an den jeweiligen Schnittpunkten korrekt gebrochen wurden, ist der neue Schnittpunkt der so erhaltenen Geraden der korrigierte Punkt P .

kombinieren. Weiter ist es an dieser Stelle möglich, einen ICP oder SLAM einzusetzen, um das Gesamtergebnis zu optimieren.

3.5.2 Spezielles Brechungsmodell unter Wasser

Da sich ein Teil, der in dieser Arbeit betrachteten Szene, unter der Wasseroberfläche befindet, ist es für eine korrekte Rekonstruktion notwendig, die Brechung an der Grenzfläche zu beachten. Hierzu wird die oben, in Abschnitt 3.5.1, erklärte Methode zur allgemeinen Rekonstruktion erweitert, um die unter der Wasseroberfläche liegenden Punkte ebenfalls korrekt darstellen zu können. Die hierbei verwendete Idee ist an die von Klopfer et al. [45] angelehnt. Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Scanner muss dabei sowohl die Brechung des Kamerastrahls, als auch die Brechung des Laserstrahls berücksichtigt werden.

Zunächst wird die gesamte Szene mit der in dem Abschnitt 3.5.1 beschriebenen Methode rekonstruiert. Hierbei entsteht ein 3D-Modell aus den Punkten $P_i = (X_i, Y_i, Z_i)$, bei dem die Teile der Szene, die sich im gleichen Medium wie der Scanner befinden, korrekt rekonstruiert sind. Der unterhalb der Grenzfläche liegende Teil der Szene enthält jedoch einen, durch die

Brechung verursachen, Fehler. Um diesen Fehler zu korrigieren, ist es zunächst notwendig, die Ebenengleichung E_W der Wasseroberfläche zu kennen. Dies ermöglicht nun das Subset an Punkten p_i im Wasser, die eine weitere Korrektur benötigen, zu bestimmen. Weiter werden nun die beiden Punkte K für das Kamerazentrum und L für das Laserzentrum benötigt.

Für den Punkt p_i gilt ebenso, dass er den Schnittpunkt zweier Geraden darstellt, von denen eine durch das Kamerazentrum und die andere durch das Laserzentrum verlaufen. Die beiden Geraden g_{i_K} und g_{i_L} stehen jeweils für den Kamera- und Laserstrahl. Da der Punkt p_i unterhalb der Wasseroberfläche, also der Ebene E_W liegt, existiert zu jeder der Geraden g_{i_K} und g_{i_L} je ein Schnittpunkt S_{i_K} und S_{i_L} mit der Ebene E_W . Dies sind die Punkte, an denen die beiden Geraden jeweils gebrochen werden müssen, um den korrekten Verlauf darzustellen und den eigentlichen, von der Brechung nicht mehr beeinflussten, Punkt P_i durch das Schneiden der Geraden zu finden. Dies ist in der Abbildung 3.7 verdeutlicht. Die Grafik zeigt den Kamerastrahl, in Rot, der von der Kamera zur Wasseroberfläche verläuft. Ebenso den Laserstrahl in Grün, vom Laserzentrum zu seinem Schnittpunkt mit der Wasseroberfläche. Der nicht korrigierte Punkt p_i ist der Schnittpunkt der Verlängerung dieser beiden Geraden unterhalb der Wasseroberfläche. Sind die beiden Schnittpunkte durch Gleichsetzen und Lösen des entstehenden Gleichungssystems gefunden, muss der Einfallswinkel der Geraden auf die Grenzfläche bestimmt werden:

$$\delta_{1_i} = \arccos \left(\frac{N_W \cdot r_{g_i}}{\|N_W\| \|r_{g_i}\|} \right) \quad (3.57)$$

wobei N_W die Normale der Wasseroberfläche E_W und r_{g_i} den Richtungsvektor der Geraden g_i beschreibt. Der neue Ausfallswinkel δ_{2_i} lässt sich nun mit Hilfe des Brechungsgesetzes (3.43) berechnen

$$n_1 \cdot \sin(\delta_{1_i}) = n_2 \cdot \sin(\delta_{2_i}) \quad (3.58)$$

$$\delta_{2_i} = \arcsin \left(\frac{n_1 \cdot \sin(\delta_{1_i})}{n_2} \right) \quad , \quad (3.59)$$

mit der Gleichung (3.57) für δ_{1_i} ergibt sich

$$\delta_{2_i} = \arcsin \left(\frac{n_1 \cdot N_W \cdot r_{g_i}}{n_2 \|N_W\| \|r_{g_i}\|} \right) \quad . \quad (3.60)$$

Jetzt werden die beiden Geraden g_{i_K} und g_{i_L} jeweils soweit um die Punkte S_{i_K} und S_{i_L} gedreht, dass der Winkel zwischen der Normalen N_W und den Geraden g'_{i_K} und g'_{i_L} den Winkeln $\delta_{2_{i_K}}$ und $\delta_{2_{i_L}}$ entsprechen. Um dieses Problem zu vereinfachen, wird zunächst eine neue Basis B_i gewählt, die durch die Wasserebene E_W , deren Normale N_W und die Projektion der Geraden g_i auf die Ebene E_W aufgestellt wird. Dies ist in der Abbildung 3.7 verdeutlicht. Für die Kamera wird ein neues Koordinatensystem gewählt, deren Ursprung im Schnittpunkt des Kamerastrahls mit der Wasseroberfläche liegt. Aufgespannt wird dieses durch die Normale der Wasseroberfläche N_W , die neue z-Achse, der Geraden vom Schnittpunkt mit der Wasseroberfläche und der Projektion des Kamerazentrums entlang der N_W auf die Wasseroberfläche, als y-Achse, und einer hierzu orthogonalen x-Achse. Die Projektion des Kamerazentrums auf die Wasseroberfläche und die

Gerade zwischen diesem Punkt und dem Schnittpunkt des Kamerastrahls und der Wasseroberfläche sind in der Abbildung 3.7 als rote, gestrichelte Linien dargestellt. Simultan ist dies für den Laserstrahl in grün in der Grafik zu sehen. Die neue Basis

$$B_i = \left[(v \times N_W) \quad v \quad N_W \right] \quad (3.61)$$

aus der Wassernormalen N_W und dem Vektor

$$v = \frac{L' - S'_i}{\|L' - S'_i\|} \quad (3.62)$$

vom Schnittpunkt der Geraden mit der Wasserebene und der Projektion des Kamera-/Laserzentrums auf die Wasseroberfläche K' und L' . Somit befindet sich die Gerade g_i in der yz -Ebene der neuen Basis. Die neue Gerade g'_i lässt sich durch eine Drehung der Geraden g_i um die x -Achse der neuen Basis B_i , mit der zuvor bestimmten Winkeldifferenz $\Delta_\delta = \delta_{2_i} - \delta_{2_i}$ bestimmen. Sei $T_{B_i}^A$ die Transformation aus dem ursprünglichen Koordinatensystem in die neue Basis B_i und R_α die Rotationsmatrix für eine Drehung um die x -Achse mit dem Winkel α . Somit lässt sich g'_i wie folgt bestimmen:

$$r_{g'_i} = r_{g_i} T_{B_i}^A{}^{-1} R_{\Delta_\delta} T_{B_i}^A \quad (3.63)$$

Die Geraden g'_{i_K} und g'_{i_L} beschreiben somit den korrekten Verlauf der Kamera- und Laserstrahlen mit der Brechung an der Grenzfläche. Der Schnittpunkt dieser ist somit der korrekte Punkt P_i zu dem Punkt p_i . Dies ist ebenfalls in der Abbildung 3.7 für Kamera- und Laserstrahl zu sehen. Die beiden gebrochen Geraden schneiden sich im neuen, korrigierten Punkt P_i . Da das Schneiden zweier Geraden, bezüglich kleiner Winkelfehler der Geraden, jedoch sehr fehleranfällig ist, wird für den Laserstrahl eine neue Ebene bestimmt mit der anschließend der gebrochene Kamerastrahl geschnitten wird. Diese gebrochene Laserebene wird für jeden Punkt p_i aus dessen gebrochener Gerade g'_{i_L} und der Schnittgeraden zwischen Wasseroberfläche E_W und der Laserebene E_L gebildet.

Kapitel 4

Aufbau des Systems

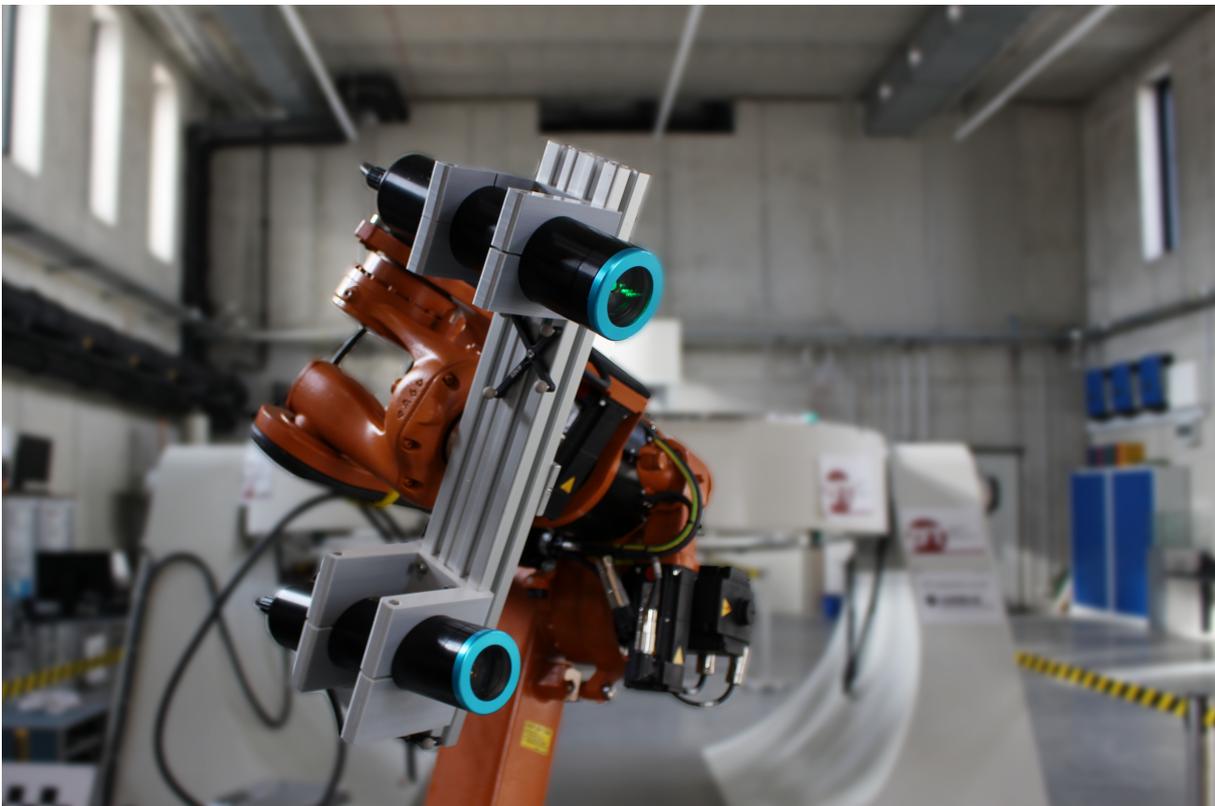


Abbildung 4.1: Der verwendete SL-Kreuzlinienlaserscanner an einem KUKA Manipulatorarm.

Dieses Kapitel beschreibt sowohl den Aufbau des verwendeten SL-Laserscanners, zu sehen in Abbildung 4.1, und die dort verbauten Komponenten, als auch den grundsätzlichen Versuchsaufbau für die im Kapitel 5 beschriebenen Versuche. Ebenfalls wird in dem Abschnitt 4.2 ein kurzer Einblick in die Verwendung des Scanners für die Unterwasser-3D-Rekonstruktion gegeben.

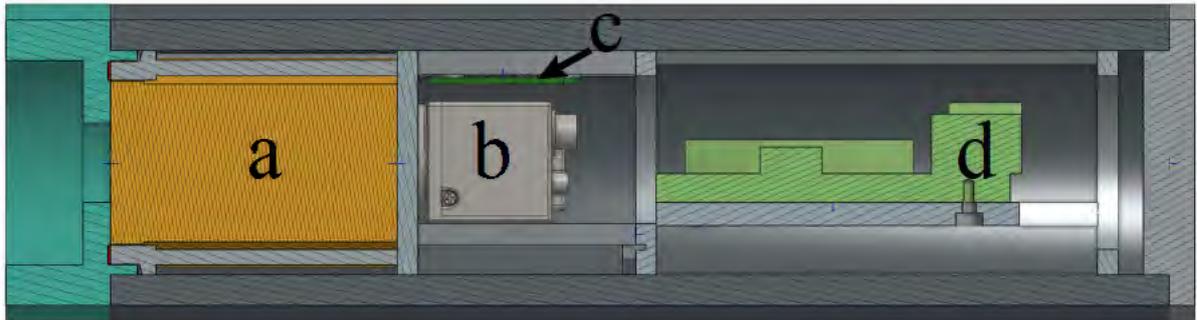


Abbildung 4.2: Die Abbildung zeigt einen Querschnitt des Kameragehäuses mit den dort verbauten Komponenten. Links, (a), befindet sich das verwendete 12,5 mm Objektiv, gefolgt von (b) einer *FLIR Blackfly* Kamera, einer IMU (c) und einem *UP Board* für die Kontrollbefehle und der Bildverarbeitung.

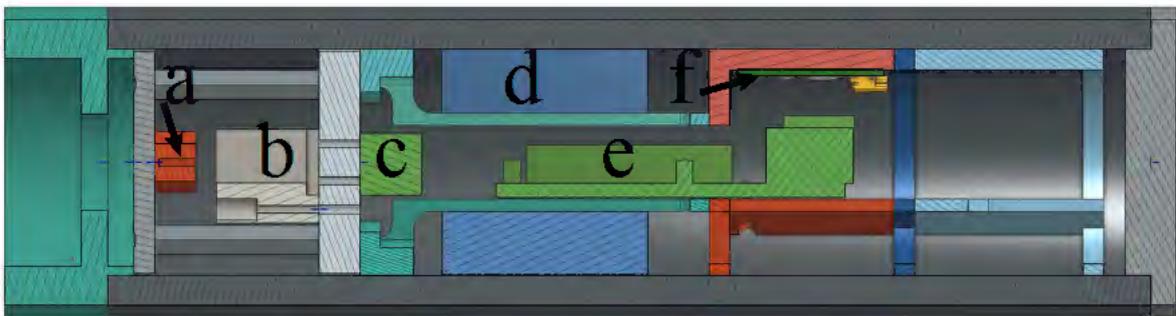


Abbildung 4.3: Das Lasergehäuse besteht im linken Teil aus den notwendigen Komponenten für die beiden Laserlinien, die sich wie folgt untergliedern: (a) die Linienoptiken, (b) die Strahlenkorrekturprismen, (c) die beiden 1 W grünen 525 nm Laserdioden, (e) einem *Raspberry Pi 3*, (f) einer IMU.

4.1 Aufbau des 3D-Laserscanners

Dieser Abschnitt beschreibt den Aufbau des SL-Kreuzlinienlaserscanners, der in dieser Arbeit verwendet wird. Er besteht grundlegend aus zwei, bis zu einer Wassertiefe von 1700 m wasserdichten, Aluminium Gehäusen, die durch eine Aluminiumstange fest miteinander verbunden sind. In dem einen Gehäuse, Abbildung 4.2, befindet sich die Kamera und in dem anderen, Abbildung 4.3, zwei Linienlaser.

In beiden Gehäusen befindet sich jeweils sowohl eine IMU, als auch ein kleiner Computer, die über Ethernet miteinander verbunden werden. Die Computer werden dazu verwendet, Laser und Kamera anzusteuern und die Bilder der Kamera auszuwerten. Hierbei werden das Aufleuchten der Laser mit der Verschlusszeit der Kamera synchronisiert, um im Feldbetrieb möglichst viel Strom einzusparen. Die beiden Gehäuse befinden sich auf einer Aluminiumstange, wobei das Kameragehäuse in einem Winkel von 30° zu dieser Stange montiert ist und das Lasergehäuse einen Abstand von ca. 40 cm zur Kamera besitzt und in einem Winkel von 90° befestigt ist. Das

Sichtfeld der Kamera und der Öffnungswinkel des Lasers betragen 45° .

In Abbildung 4.2 ist ein Querschnitt des CAD-Modells des Kameragehäuses zu erkennen. 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 1920×1200 Pixel bei 41 Bildern pro Sekunde. Mittig über der Kamera befindet sich (c) die IMU.

Die Abbildung 4.3 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.

4.2 Konfiguration für die Anwendung unter Wasser

Die ersten Funktionstests des gebauten SL-Kreuzlinienlaserscanners wurden unter Wasser durchgeführt. In der Abbildung 4.4 rechts ist der Scanner unter kontrollierten Bedingungen in einem Wassertank zu sehen, während die ersten Testdaten aufgenommen wurden. Hierbei sollte das zusehende Metallgitter eingescannt werden, da es eine gleichmäßige und gut zu erkennende Struktur bietet. In der Abbildung 4.5 sind die ersten, noch nicht weiter bearbeiteten Ergebnisse zu sehen. Die grundlegende Struktur des Gitters ist auch hier bereits gut zu erkennen. Jedoch stellte sich bei diesen Versuchen eine korrekte Schätzung der Trajektorie als besonders kritischer Faktor der Rekonstruktion dar. Daher wurde für die nachfolgenden Versuche im Freiwasser eine präzise GPS-Antenne, zu sehen in der Abbildung 4.4 links, an dem Laserscanner befestigt.

Als Gewässer wurde ein See in einem stillgelegtem Steinbruch gewählt, da dort gute Sichtverhältnisse vorherrschen und der Einfluss von Wellen in einem solchen Gewässer so gering ist, dass er nicht weiter ins Gewicht fällt. Zunächst wurde der Scanner in Ufernähe getestet, hierbei fiel ein weiteres Mal auf, wie sehr Partikel im Wasser die Qualität der Aufzeichnungen und die Reichweite des Lasers beeinflussen. Die Streuung des Laserlichts, aufgrund von Schwebeteilchen, ist der in der Abbildung 4.6 links gut zu erkennen. Daraufhin wurde der Scanner aus einem Boot heraus betrieben, zu sehen in der Abbildung 4.6 rechts mit dem der Uferbereich abgefahren wurde, während die Trajektorie mit der GPS-Antenne aufgezeichnet wurde.

4.3 Versuchsaufbau für das Scannen durch die Wasseroberfläche

Für die Versuche, auf deren Ergebnisse im folgenden Kapitel genauer eingegangen wird, wurde ein fester Aufbau unter kontrollierten Bedingungen gewählt, der hier kurz beschrieben wird. Als Wasserbehälter wurde ein quadratischer Wassertank mit einer Kantenlänge von 1 m gewählt, der bis zur Hälfte mit Wasser befüllt wurde. Um den hier vorgestellten SL-Kreuzlinienlaserscanner

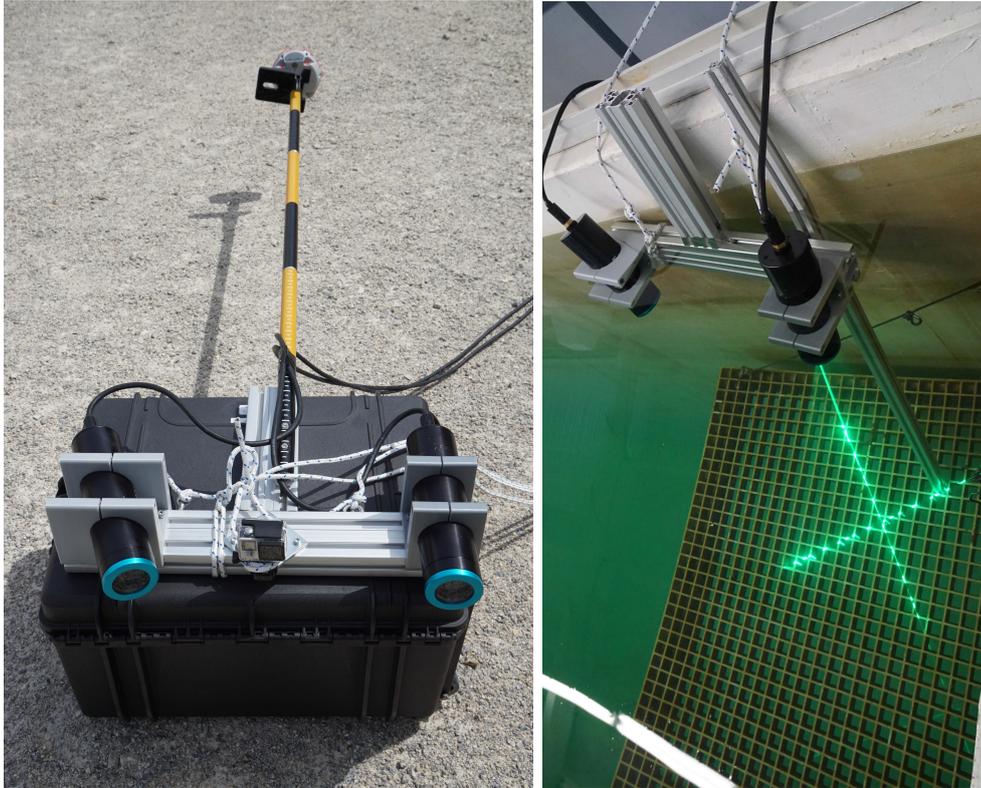


Abbildung 4.4: Das linke Bild zeigt den SL-Kreuzlinienlaserscanner, an dem eine hoch präzise GPS-Antenne befestigt wurde, um die Trajektorie des Scanners für Aufnahmen im Freiwasser aufzeichnen zu können. Das rechte Bild ist der Scanner in einem Wassertank zu sehen, während damit das unter ihm beleuchtete Metallgitter aufgezeichnet wurde.

kontrolliert und wiederholbar zu bewegen, wird er an einem KUKA KR-16 Manipulatorarm befestigt. Der somit abgefahrene Pfad und die Position der Wasseroberfläche werden mit einem OptiTrack:Trio 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 in dem linken Bild der Abbildung 4.7 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 4.7 zu erkennen. Um die benötigte Transformation zwischen dem Koordinatensystem des Trackers und der Kamera zu bestimmen, wurde, wie im mittleren Bild der Abbildung 4.7 zu sehen, die Ecken einiger Tags angetastet, die gleichzeitig in der Kamera zu sehen waren. Somit ist es möglich, eine 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.

Aufgenommen wurden insgesamt vier Datensätze, bei denen der Scanner zunächst senkrecht zur Wasseroberfläche platziert wurde und langsam über die gesamte Szene bewegt wurde. Im nächsten

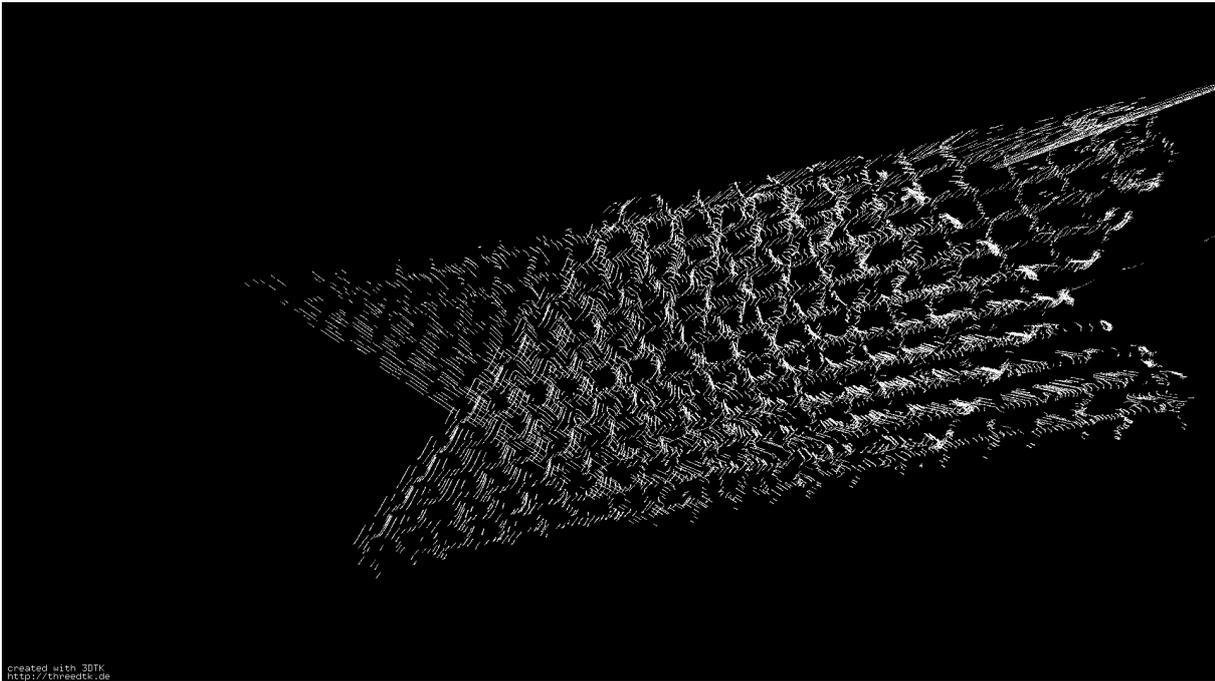


Abbildung 4.5: Der erste 3D-Scann, der mit dem SL-Kreuzlinienlaserscanner in einem Wassertank unter kontrollierten Bedingungen angefertigt wurde. Trotz der Fehler, welche aus einer schlecht aufgezeichneten Trajektorie resultieren, lässt sich die Grundstruktur des Metallgitters aus Abbildung 4.4 gut erkennen.

Schritt wurde der Scanner um einen Winkel von 5° bezüglich der Normale der Wasseroberfläche gekippt und ein weiterer Datensatz aufgezeichnet. Dies wurde weiter für die Winkel von 10° , 15° und 20° wiederholt. Dies ermöglicht eine genaue Betrachtung des Einflusses des Einstrahlwinkels auf die Verformung der Laserline an der Wasseroberfläche, die im nächsten Kapitel genauer betrachtet wird.

Als Versuchsaufbau wurden zwei Szenen gewählt. Die erste Szene, zu sehen links in der Abbildung 4.8, besteht aus einer handelsüblichen EURO-Palette aus Holz, die schräg in dem Tank platziert wurde und dabei zur Hälfte mit Wasser bedeckt war. Der zweite Aufbau, auf dem rechten Bild der Abbildung 4.8 zu sehen, ist ein Kombination aus mehreren unterschiedlichen Objekten. Im Vordergrund befindet sich ein großes Rohr, dahinter, auf einem kleinen Schachbrett stehend, eine Kaffeetasse und ein Gartenzwerg. An der Rückseite des Tanks ist ein Schachbrett angebracht. Da die Abmessungen dessen bekannt sind, ermöglicht dies eine Verifizierung der Rekonstruktion.



Abbildung 4.6: Auf dem linken Bild ist der SL-Kreuzlinienlaserscanner bei den ersten Feldtest in einem See eines Steinbruchs zu sehen. Neben dem projizierten Laserkreuz ist die Lichtstreuung durch Schwebeteilchen im Wasser sehr gut zu erkennen. Das rechte Bild zeigt, wie die ersten Aufnahmen auf einem See, aus einem Boot heraus entstanden sind. Die gefahrene Trajektorie wurde hierbei durch die am SL-Kreuzlinienlaserscanner befestigte GPS-Antenne aufgezeichnet.

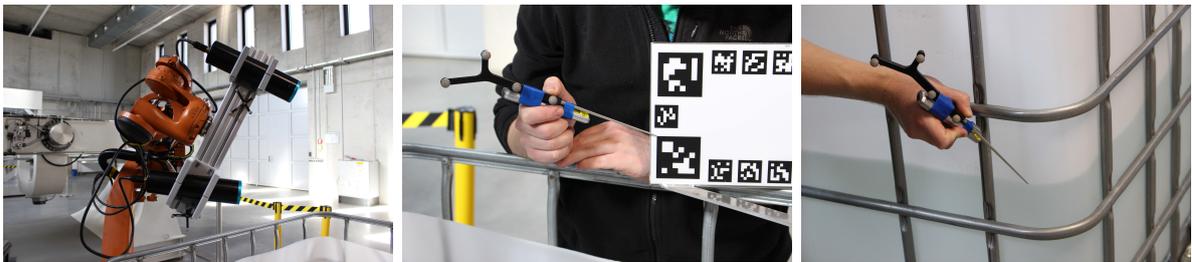


Abbildung 4.7: In der linken der drei Abbildungen sind die Marker zu erkennen, die an dem Scanner angebracht wurden, um die Bewegung des Roboters im Trackingsystem beobachten zu können. Das mittlere Bild zeigt das Antasten einiger Tags, um eine Kalibrierung zwischen der Kamera und dem Trackingsystem zu erhalten. Die rechte Abbildung zeigt das Ausmessen der Wasseroberfläche mit dem verwendeten Trackingsystem.

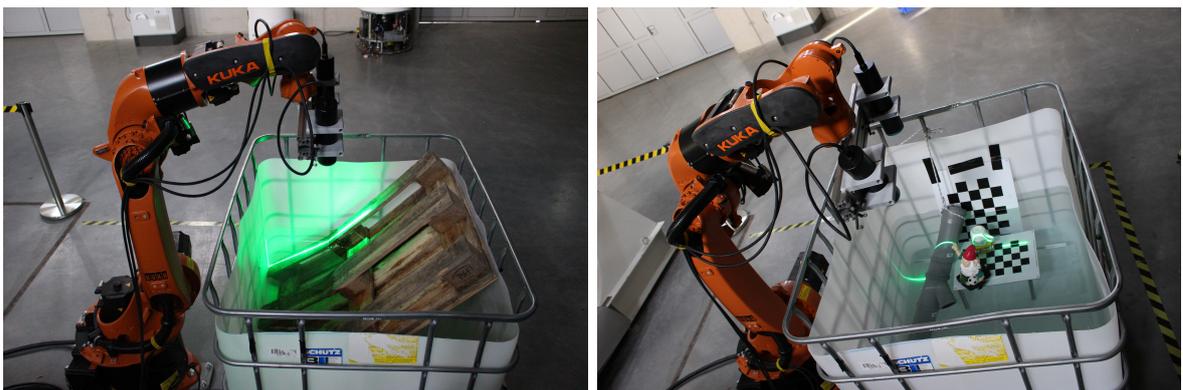


Abbildung 4.8: Die linke Abbildung zeigt die erste Szene, bei der eine EURO-Palette in dem, zur Hälfte mit Wasser befüllten, Tank platziert wurde. Das rechte Bild zeigt die zweite Szene, die aus unterschiedlichen Objekten, wie z.B. einem Gartenzweig und einem Rohr, besteht.

Kapitel 5

Versuche und Auswertung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuche diskutiert. Zunächst wird eine Methode, die es ermöglicht die Wasseroberfläche ohne zusätzliche Hilfsmittel zu erkennen, vorgestellt und anschließend mit den Ergebnissen des Trackingsystems verglichen. Daraufhin wird die in Abschnitt 3.5 vorgestellte Methode auf einen einzelnen Linienscan angewendet. Hierbei wird der Einfluss verschiedener Einstrahlwinkel demonstriert. In der anschließenden Auswertung wird die Abweichung vom Ideal vor und nach der Korrektur untersucht. Daraufhin wird ein vollständiger 3D-Scan der Szene korrigiert und auch hier die unterschiedlichen Einstrahlwinkel betrachtet. Ebenfalls wird auch hier der Fehler vor und nach der Korrektur betrachtet und für eine Bewertung der Methode herangezogen.

5.1 Bestimmung der Wasserebene aus den 3D-Daten

Im Laufe der Experimente stellte sich heraus, dass durch eine geschickte Wahl der Belichtungszeiten der Kamera, eine Spiegelung der Laserlinie auf der Wasseroberfläche im Kamerabild sichtbar wird, wie es in der Abbildung 5.1 zu sehen ist. Das Bild zeigt die erste Szene, während sie mit dem SL-Scanner abgefahren wird. Hierbei ist einmal die Laserlinie auf dem Objekt und dem Grund des Tanks zu sehen und eine Reflexion an der Wasseroberfläche. Diese kann dazu genutzt werden, die Parameter der Wasseroberfläche zu bestimmen und somit externe Marker oder ein Trackingsystem zur Bestimmung der Wasseroberfläche überflüssig zu machen. Im Folgenden werden die Abweichungen zwischen den Parametern der Wasserebene aus dem Trackingsystem und aus dem Scan miteinander verglichen.

Die Abbildung 5.2 zeigt einen Scan der ersten Szene mit der, aus dem Scan bestimmten, Wasserebene. In der rechten Abbildung ist zusätzlich noch die Normale der so bestimmten Wasserebene eingezeichnet. Um die Ebenenparameter aus der 3D-Rekonstruktion mit den, durch das Trackingsystem bestimmten, zu vergleichen, wird der Winkel zwischen den beiden Normalen und der Abstand zum Ursprung verglichen. Hierdurch lässt sich die Genauigkeit der, aus dem Scan ermittelten, Parameter gut veranschaulichen.



Abbildung 5.1: In diesen Abbildungen ist, an den gekennzeichneten Stellen, die Reflexion der Laserlinie auf der Wasseroberfläche zu erkennen. Diese Reflexion ermöglicht eine Bestimmung der Ebenenparameter aus dem 3D-Scan, ohne das hierzu ein externes Trackingsystem benötigt wird.

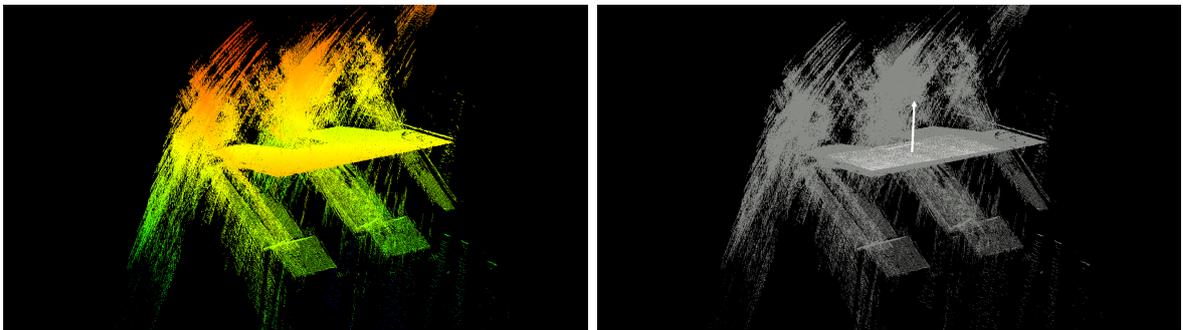


Abbildung 5.2: Die linke Abbildung zeigt die Wasserebene, die aus dem Scanner bestimmt wurde, in dem 3D-Scan der ersten Szene. In der rechten Abbildung ist zudem die Normale der Ebene zu erkennen.

Daher werden zuerst für die beide Fälle die Ebenengleichungen bestimmt. Für die mit dem Trackingsystem gemessenen Punkte der Wasseroberfläche wurden folgende Gleichung für die Wasserebene bestimmt:

$$E_T : -0,0490x - 0,9605y + 0,2740z - 0,897 = 0 \quad . \quad (5.1)$$

Aus dem 3D-Scan, der entsprechend heller belichtet wurde, um die Wasseroberfläche erkennen zu können, wurde folgende Gleichung bestimmt:

$$E_S : -0,0471x - 0,9597y + 0,2771z - 0,907 = 0 \quad . \quad (5.2)$$

Für den ersten Vergleich der beiden Ebenen wird nun der Winkel zwischen den Normalen N_T und N_S der Ebenen E_T und E_S bestimmt. Werden die beiden Normalen in die Gleichung

$$\delta = \arccos \left(\frac{N_T \cdot N_S}{\|N_T\| \|N_S\|} \right) \quad (5.3)$$

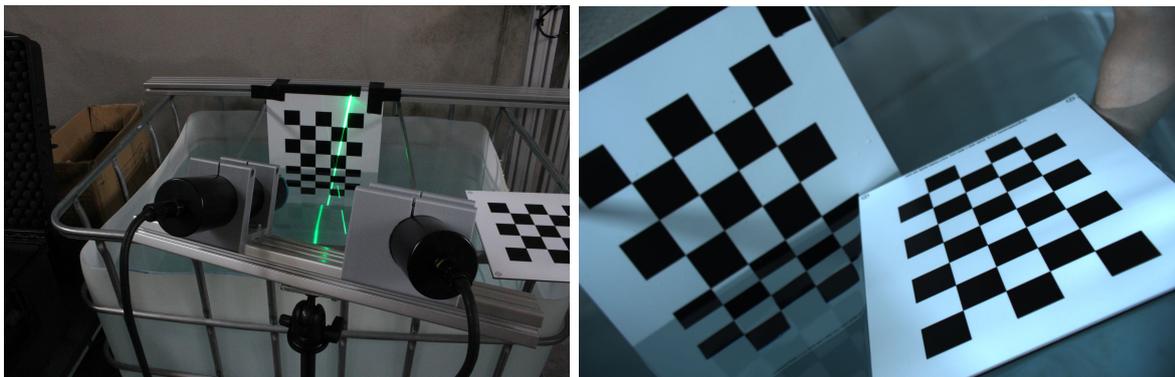


Abbildung 5.3: Links ist der einfache Versuchsaufbau für die ersten Verifikationen sichtbar. Ein Schachbrett wurde zur Hälfte im Wasser versenkt und der Scanner in ca. 1 m Entfernung platziert. Anschließend wurden einige Aufnahmen in unterschiedlichen Winkeln zu Wasseroberfläche aufgenommen. Das rechte Bild zeigt, wie mithilfe eines zweiten Schachbretts, die Lage der Wasseroberfläche bezüglich der Kamera kalibriert wurde.

eingesetzt, so ergibt sich für δ ein Winkel von $0,2074^\circ$. Durch umstellen der Ebenengleichungen in die Hessesche Normalform, lässt sich der Abstand d der Ebenen zum Ursprung einfach berechnen. Dies ergibt für E_T einen Abstand von $d_T = 0,897$ m und für E_S einen Abstand von $d_S = 0,907$ m. Der Abstand der Ebenen zueinander beträgt somit $\Delta_d = d_S - d_T = 1$ cm.

Der sehr kleine Winkelfehler von $0,2074^\circ$ 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.

5.2 Ergebnis mit statischem Scanner

In diesem Abschnitt wird zunächst die in 3.5.2 beschriebene Methode auf einem einzelnen Linienscan angewendet. Dies diente als erste Verifizierung für die Funktionalität der implementierten Methodik. Hierzu wurde ein einfacher Versuchsaufbau, zu sehen links in der Abbildung 5.3, gewählt, in dem ein Schachbrett zur Hälfte im Wasser versenkt wurde. Der Scanner wurde in einem Abstand von circa 1 m vor diesem platziert und Aufnahmen in verschiedenen Winkeln zu Wasseroberfläche gemacht. Die Position der Wasseroberfläche bezüglich der Kamera wurden dabei mithilfe eines weiteren Schachbretts erfasst, dies ist rechts in der Abbildung 5.3 zu sehen. Im Folgenden werden zwei Aufnahmen aus diesem Aufbau betrachtet, wobei die erste den steilsten und die zweite den flachsten Winkel des Versuchs darstellen. Hierbei wird bereits der Einfluss des Einstrahlwinkels sichtbar. Die Lücken in den beiden Linien sind in beiden Versuchen bedingt durch die unterschiedlich hohe Reflektivität der schwarzen und weißen Felder auf dem Schachbrett,

auf das die Linie projiziert wurde. Um den Fehler nach der Korrektur auswerten zu können, wurde zuvor für jeden unterhalb der Wasseroberfläche liegenden Punkte ein Referenzpunkt bestimmt. Bei der Berechnung dieses Punktes wurde die Brechung des Kamerastrahls an der Wasseroberfläche berücksichtigt. Anschließend wurde dieser gebrochen Strahl jedoch nicht mit der Laserebene, sondern mit der Schachbrettebene geschnitten. Da bekannt war, dass die Punkte auf der Schachbrettebene liegen, kann diese als Referenz verwendet werden, um das Modell für die Brechung des Lasers zu verifizieren.

Die Abbildung 5.4 zeigt die Ergebnisse der ersten Aufnahmen. In den Abbildungen ist die Wasseroberfläche jeweils als blaue, die Laserebene als grüne und das Schachbrett als gelbe Ebene eingezeichnet. Die 3D-Rekonstruktion der Linie ohne Berücksichtigung der Brechung ist in Rot eingezeichnet und die Korrektur der Linie in Grün. Ebenfalls wurden das Kamera- und Laserzentrum eingezeichnet. Bei diesen Aufnahmen wurde der Scanner so ausgerichtet, dass die Laserlinie fast senkrecht auf die Wasseroberfläche auftrifft. Die somit auftretende Brechung ist relativ gering, jedoch auch hier schon sichtbar. Am deutlichsten ist dies unten rechts in der Abbildung 5.4 zu erkennen. Hier ist der Blick senkrecht auf die Wasser- und die Schachbrettebene gerichtet. Der durch die Brechung bedingte Knick der roten, nicht korrigierten, Punkte an der Wasseroberfläche ist hierbei deutlich zu erkennen. Nach der Korrektur liegen die Punkte gut sichtbar auf der Schachbrettebene. Die grünen, korrigierten, Punkte unter der Wasseroberfläche bilden mit den roten Punkten über der Wasseroberfläche näherungsweise eine Gerade. Der mittlere Fehler im Abstand zwischen den Referenzpunkten auf der Schachbrettebene und den grünen Punkten liegt bei 1 cm.

Die Abbildung 5.5 zeigt die Ergebnisse zu der zweiten Aufnahme, bei der die Laserlinie mit einem flachen Winkel zur Wasseroberfläche ausgerichtet war. In diesen Abbildungen ist die Brechung und deren Auswirkung deutlich sichtbar. Sowohl in der oberen linken, als auch in der oberen rechten Abbildung der Grafik 5.5 ist deutlich zu erkennen, dass die rote Linie unterhalb der Wasseroberfläche nicht mehr auf der Ebene des Schachbrettes liegt. Dies lässt sich ebenso gut unten links in der Abbildung 5.5 erkennen. In dieser ist die Blickrichtung senkrecht zur Wasser- und Schachbrettebene. Die rote Linie knickt am rechten Ende deutlich nach oben ab und ist, verglichen mit den korrigierten Punkten, um einiges gestaucht. Die eigentlich stattfindende Brechung der Laserebene an der Wasseroberfläche bleibt bei den nicht korrigierten Punkten ebenfalls unbeachtet, wird bei einem Blick auf die korrigierten Punkte in der unteren rechten Grafik der Abbildung 5.5 jedoch deutlich. Nach der Korrektur befinden sich die Punkte nicht nur auf der Ebene des Schachbrettes, auch die Brechung der Laserebene und der somit veränderte Scannbereich werden korrekt dargestellt. Der mittlere Fehler bezüglich der korrigierten Punkte und deren Abstand zu den, auf der Schachbrettebene liegenden, Referenzpunkten beträgt 1 cm.

Werden hierbei nun die Fehler, die durch die gesamte Kalibrierung entstanden sein können, miteinbezogen, kann davon ausgegangen werden, dass die Methode zur Korrektur der Punkte funktioniert. Ein weiterer Fehler, den es in zukünftigen Versuchen zu eliminieren gilt, ist die exakte Lage des Laserzentrums bezüglich der Kamera. Dies wird in den vorliegenden Versuchen lediglich grob geschätzt und ist somit für den noch vorhandenen Fehler mitverantwortlich. Da die Funktionstüchtigkeit der hier untersuchten Methode in diesen ersten Versuchen auf einzelnen Scanlinien gezeigt werden konnte, werden im nächsten Schritt vollständige Scans einer größeren

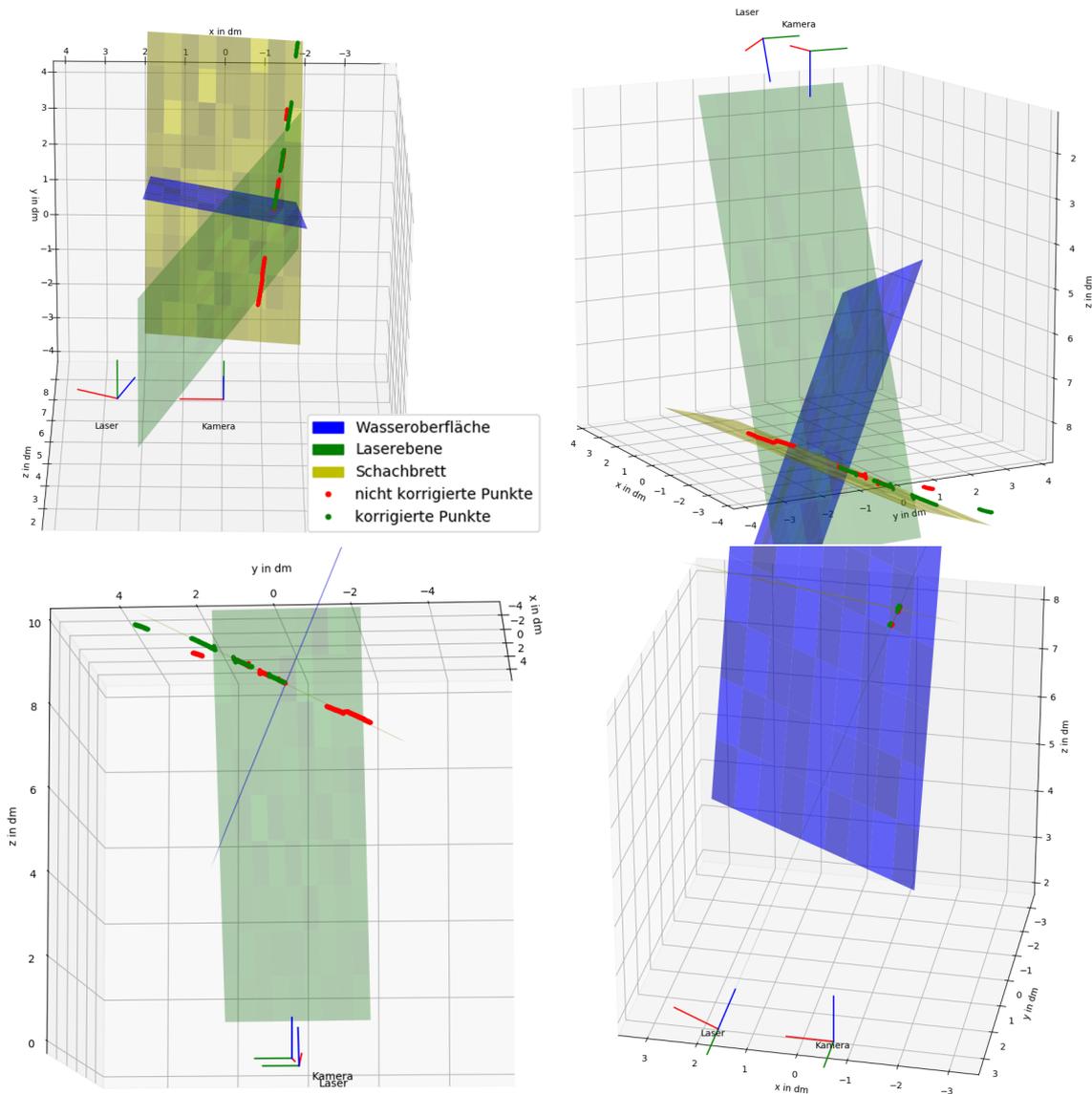


Abbildung 5.4: Die Abbildungen zeigen die Rekonstruktion einer einzelnen Laserlinie mit und ohne Korrektur an der Wasseroberfläche. Hierbei ist die Ebene der Laserlinie in Grün, die Wasserebene in Blau und das Schachbrett, auf das die Laserlinie projiziert wurde, in Gelb eingezeichnet. Die rekonstruierte Linie ohne Berücksichtigung der Brechung ist in Rot eingezeichnet, die unterhalb der Wasseroberfläche liegenden und korrigierten Punkte sind in Grün gekennzeichnet. Die Brechung und Stauchung der Linie ist in diesen Abbildungen, aufgrund steilen Winkels zur Wasseroberfläche, nur sehr schwach ausgeprägt. Die linke untere Abbildung wurde so ausgerichtet, dass senkrecht auf die Wasserebene und das Schachbrett geschaut wird. Hierbei wird die Brechung der roten Linie, durch den Knick nach oben, deutlich. Die Korrektur, zu sehen als grüne Linie, liegt jedoch in der Ebene des Schachbretts und setzt die rote Gerade fort. Der mittlere Fehler zwischen den rekonstruierten Punkten und den Referenzpunkten auf dem Schachbrett beträgt 1 cm. Die rechte untere Abbildung wurde so ausgerichtet, dass senkrecht auf die Laser- und Wasserebene geschaut wird. Diese Ansicht verdeutlicht die Brechung der Laserebene an der Wasseroberfläche.

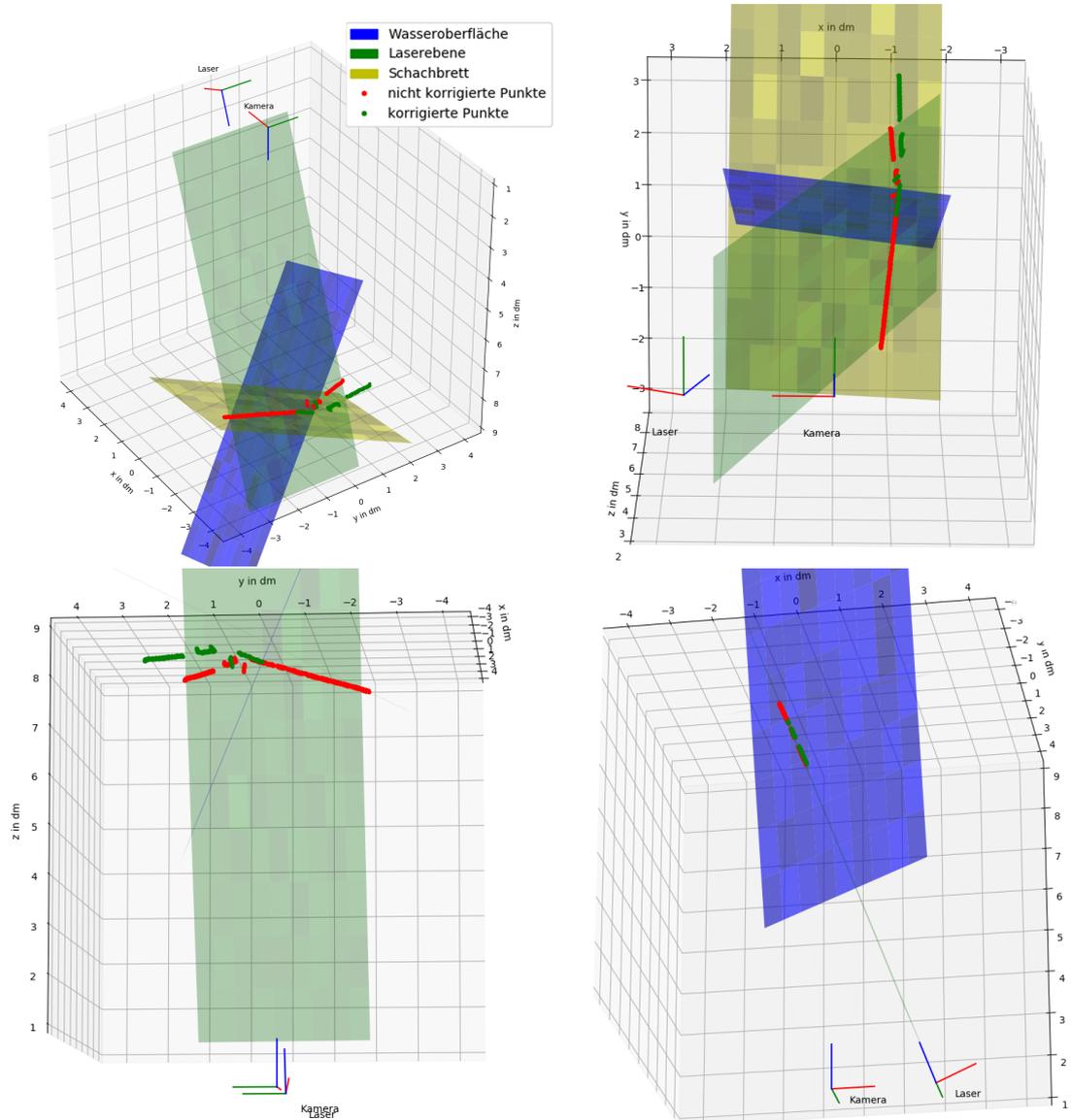


Abbildung 5.5: In diesen Abbildungen sind identisch zu den Abbildungen der Grafik 5.4, jedoch wurde hier ein flacherer Winkel zur Wasseroberfläche gewählt. Dies sorgt dafür, dass die Brechung an der Wasseroberfläche, gemäß dem Brechungsgesetz, eine größere Auswirkung auf die Linie hat, als bei einem nahezu senkrechten Einstrahlwinkel. Die Brechung und Stauchung ist in beiden Abbildungen deutlicher zu erkennen als in den vorherigen. Unten links wurde die Wasser- und Schachbrettebene senkrecht zur Blickrichtung gewählt. Dies lässt die Brechung der roten Linie an der Wasserebene, durch einen Knick nach oben, deutlich erkennen. Die grüne, korrigierte, Linie hingegen liegt in der gleichen Ebene wie die rote Linie. Die durchschnittliche Abweichung der korrigierten Punkte zu den Referenzpunkten auf der Ebene des Schachbretts beträgt hierbei 1 cm. Die untere rechte Abbildung ist senkrecht zur Wasser- und Laserebene ausgerichtet, die verdeutlicht neben der Brechung auch die Stauchung der Linie, die nicht korrigierte Linie ist unterhalb der Wasseroberfläche deutlich kürzer als die korrigierte.

Szene korrigiert und analysiert. Während der Scanner für die bisher betrachteten Fälle statisch angebracht war, wird er für die Folgenden an einem KUKA KR-16 Manipulatorarm befestigt und durch diesen definiert, reproduzierbar bewegt.

5.3 Ergebnis mit bewegtem Scanner

In diesem Abschnitt wird die Methode zur Korrektur der Brechung an der Wasseroberfläche weiter getestet. Entgegen des vorherigen Abschnitts wird hierbei nicht mehr nur eine einzelne Linie des statisch angebrachten Scanners betrachtet. Hier wird nun der in Abschnitt 4.3 beschriebene Aufbau verwendet. 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 liegenden Punkten in Rot und den unter der Wasseroberfläche liegenden Punkten in Blau.

Da die Verwendung eines KUKA Manipulators es ermöglicht, den Scanner in einem vorher festgelegten Winkel konstant über die gesamte Szene zu bewegen, wird zuerst der Einfluss unterschiedlicher Einfallswinkel betrachtet. Die erste Aufnahme geschah mit einem senkrecht zur Wasseroberfläche ausgerichteten Scanner, anschließend wurde der Winkel in 5° Schritten bis auf 20° erhöht. Die aus diesen Scans resultierenden Daten, sind in der Abbildung 5.6 zu sehen. Die obere Abbildung zeigt den 3D-Scan der ersten Szene mit der EURO Palette, die untere zeigt die zweite Szene. In beiden sind jeweils alle fünf Scans der verschiedenen Winkel übereinandergelegt. Daraufhin wird im zweiten Schritt die hier beschriebene Methode zur Korrektur auf den Datensatz angewendet, um die entstanden Fehler durch die Brechung zu korrigieren. Im Anschluss werden sie miteinander verglichen und die Fehler ausgewertet.

Die Abbildungen 5.7, 5.8 und 5.9 zeigen der Reihe nach die 3D-Scans der ersten Szene. Begonnen wird mit dem Scan, bei dem der Laserscanner einen Einstrahlwinkel von 0° aufweist und somit senkrecht zur Wasseroberfläche positioniert ist. Bereits hier ist eine leichte Brechung zwischen den über und den unter Wasser liegenden Punkten sichtbar. Das untere Bild der Abbildung 5.7 zeigt einen Einstrahlwinkel von 5° . Der unterschiedliche Brechungswinkel ist hierbei bereits durch ein größeres Abknicken und auch eine Stauchung in der Höhe des Scans sichtbar. Dieser Effekt wirkt sich mit wachsendem Einfallswinkel stärker auf die Rekonstruktion aus. Zu beobachten ist dies über die Aufnahmen für 10° und 15° in Abbildung 5.8 bis hin zu 20° im oberen Teil der Abbildung 5.9. Dies verdeutlicht den Einfluss, den bereits 5° Winkeländerung auf die Brechung an der Wasseroberfläche haben. Im direkten Vergleich zwischen der 20° Aufnahme und dem korrigierten Scan, in Abbildung 5.9 ist dies besonders auffällig. Während in der oberen Abbildung ein deutlicher Knick an der Wasserlinie in der Palette zu erkennen ist, bilden in der unteren Abbildung die Bretter der Palette eine durchgängige Ebene. Ebenfalls wird die Stauchung, bedingt durch die Brechung, des gesamten Scans deutlich. Eine Verbesserung des Ergebnisses durch Anwendung der zuvor beschriebenen Methode auf den Datensatz ist bereits hier zu erkennen.

Abbildung 5.10 stellt nochmals den ursprünglichen Datensatz mit dem Korrigierten direkt

gegenüber. Beide Darstellungen sind farblich nach der Höhe, von Blau nach Rot, eingefärbt. In der oberen Aufnahme sind alle nicht korrigierten Scans übereinander gelegt, während die untere das Ergebnis nach der Korrektur zeigt. Links unten in der oberen Aufnahme ist der Effekt durch die Brechung am besten zu erkennen. Dort fächert sich sowohl das Brett der Palette stückweise auf, als auch der Boden des Tanks besteht sichtbar aus mehreren Ebenen, die sich schrittweise mehr nach oben hin wölben. Wird die gleiche Stelle in der unteren Aufnahme betrachtet, ist dieser Effekt nicht mehr zu erkennen, er wurde erfolgreich korrigiert.

Weiter verdeutlicht wird dies auch in der Abbildung 5.11. Sie zeigt einen Querschnitt durch die Palette. Oben links beginnend finden sich die Aufnahmen für 5° , rechts davon 10° , bis hin zu unten links 20° 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.

Die Abbildungen 5.12, 5.13 und 5.14 zeigen, ebenso wie zuvor bei der ersten Szene, die zweite Szene in Einzelaufnahmen, beginnend bei 5° , über 20° bis hin zur Korrektur des Datensatzes. Durch die Wahl des Blickwinkels fällt die Stauchung bezüglich der Höhe des Scans besonders auf. Auch an dem quer durch die Szene ragendem Rohr wird die Brechung unterhalb der Wasseroberfläche deutlich. Je größer der Einfallswinkel wird, je mehr wird das Rohr in Richtung der Wasseroberfläche gebrochen und der im Wasser liegende Teil des Scans gestaucht. Ist dieser Effekt Anfangs, bei senkrechter Positionierung des Scanners, nur sehr gering sichtbar, so wird er über den Verlauf sehr deutlich. Wie auch in den Aufnahmen der ersten Szene ist dieser Fehler nach der Korrektur nahezu vollständig eliminiert. Der unterhalb der Wasseroberfläche liegende Teil ist nicht mehr verkürzt und das Rohr bildet eine gerade Linie. Auch hier ist also der Erfolg der hier erarbeiteten Methode zu erkennen. Zuletzt wurde auch bei dieser Szene ein Bild, Abbildung 5.15, erstellt, in dem die Punkte nach Höhe eingefärbt wurden. Das obere Bild zeigt alle nicht korrigierten Scans übereinander. Durch den gewählten Blickwinkel wird hier Veränderung über den steigenden Winkel besonders im unteren Bereich des Bildes sichtbar. Der Boden des Wassertanks liegt für jeden Winkelschritt etwas höher, sodass sich der Boden scheinbar auffächert. Ebenfalls macht sich der Effekt durch Wölbungen auf dem Rohr bemerkbar. Dahingegen ist das Rohr, in der korrigierten Aufnahme darunter, deutlich und ohne solche Verformungen zu erkennen. Der auffälligste Teil, der Boden des Tanks, der in der oberen Abbildung nicht deckungsgleich ist, liegt nach der Korrektur sichtbar in einer Ebene. Die Stauchung der Szene, bedingt durch die Brechung, fällt im direkten Vergleich mit den korrigierten Daten besonders auf.

Nachdem die Funktionsfähigkeit der hier erklärten Methode zur Korrektur der Lichtbrechung an der Wasseroberfläche in 3D-Scans nun durch die Anwendung auf mehreren Datensätzen visuell gezeigt wurde, werden im Folgenden nochmals die Scans der ersten Szene verwendet, um Fehlermessungen durchzuführen. Da, bis auf eine geringe Abweichung, davon ausgegangen werden kann, dass die unteren Bretter der eingescannten Palette eine Ebene bilden, wird dies nun als Referenz betrachtet. Zunächst wird für jeden Winkelschritt eine Ebene in die über- und unterhalb der Wasseroberfläche liegenden Punkte eines Brettes der Palette gelegt. Anschließend wird der Winkel zwischen diesen beiden Ebenen berechnet und die Veränderung dieses Winkels

Tabelle 5.1: Auswertung der Winkelfehler in den 3D-Scans der ersten Szene. Hierbei wurde in die Oberfläche des mittleren Balkens der Palette jeweils für über und für unter Wasser eine Ebene gelegt. Der Winkelfehler gibt den Winkel in Grad zwischen diesen beiden Ebenen an. Die RMS-Fehler beschreiben den Fehler zwischen den Punkten und der gemittelten Ebene in cm.

Scan	Winkelfehler	RMS-Fehler über Wasser	RMS-Fehler unter Wasser
0 Grad	10,036°	0,83 cm	0,96 cm
5 Grad	10,976°	0,71 cm	1,34 cm
10 Grad	12,166°	0,82 cm	1,00 cm
15 Grad	13,591°	0,94 cm	1,43 cm
20 Grad	15,316°	0,91 cm	1,23 cm
Korrigiert	1,1113°	1,10 cm	1,85 cm

über die verschiedenen Aufnahmen betrachtet. Zuletzt wird dies auch auf den korrigierten Scan angewendet. Für diese Auswertung wurde jeweils der mittlere Balken der Palette aus der ersten Szene gewählt. 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 der Tabelle 5.1 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. Begonnen mit dem Scan bei dem der Scanner senkrecht zur Wasseroberfläche ausgerichtet war, zeigt sich hier ein Winkelfehler von 10,04°, der ebenfalls links oben in der Abbildung 5.11 zu sehen ist. Wie sich auch bereits in dieser Abbildung 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 10,04° und 10,98° noch nahe beieinander, so sind es bei einem Einstrahlwinkel von 10° bereits 12,17° Unterschied zwischen den beiden Ebenen. Für den nächsten Winkelschritt, bei dem der Scanner eine Ausrichtung von 15° hat, steigt der Fehler um weitere 1,5° auf 13,59° an. Der größte Fehler, wie auch schon in den Abbildungen zu sehen, wird bei einem Einstrahlwinkel von 20° erreicht. An dieser Stelle steigt der Fehler auf 15,32° an. Der RMS-Fehler liegt bei allen Aufnahmen für über und unter Wasser zwischen 0,8 cm und 1,5 cm. Dieser lässt darauf schließen, dass die Oberfläche der Balken keine perfekte Ebene bilden, sondern geringfügige Abweichungen vorhanden sind. Ebenfalls ist der Einfluss einiger geringfügiger Kalibrierfehler zu berücksichtigen.

Zuletzt wurde ein Datensatz, der aus allen zuvor aufgenommenen Daten aus unterschiedlichen Winkeln besteht, mit der hier entwickelten Methode korrigiert. Anschließend wurde auch hier in den teilweise über und unter der Wasseroberfläche liegenden Balken je eine Ebene gelegt. Der Winkel zwischen diesen beiden Ebenen beträgt hierbei nur noch 1,11°. Der RMS-Fehler liegt mit 1,10 cm über und 1,85 cm unter Wasser leicht über den Werten der nicht korrigierten Daten. Dies lässt sich teilweise durch das Zusammenfassen der Datensätze erklären. Der 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, dass 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.

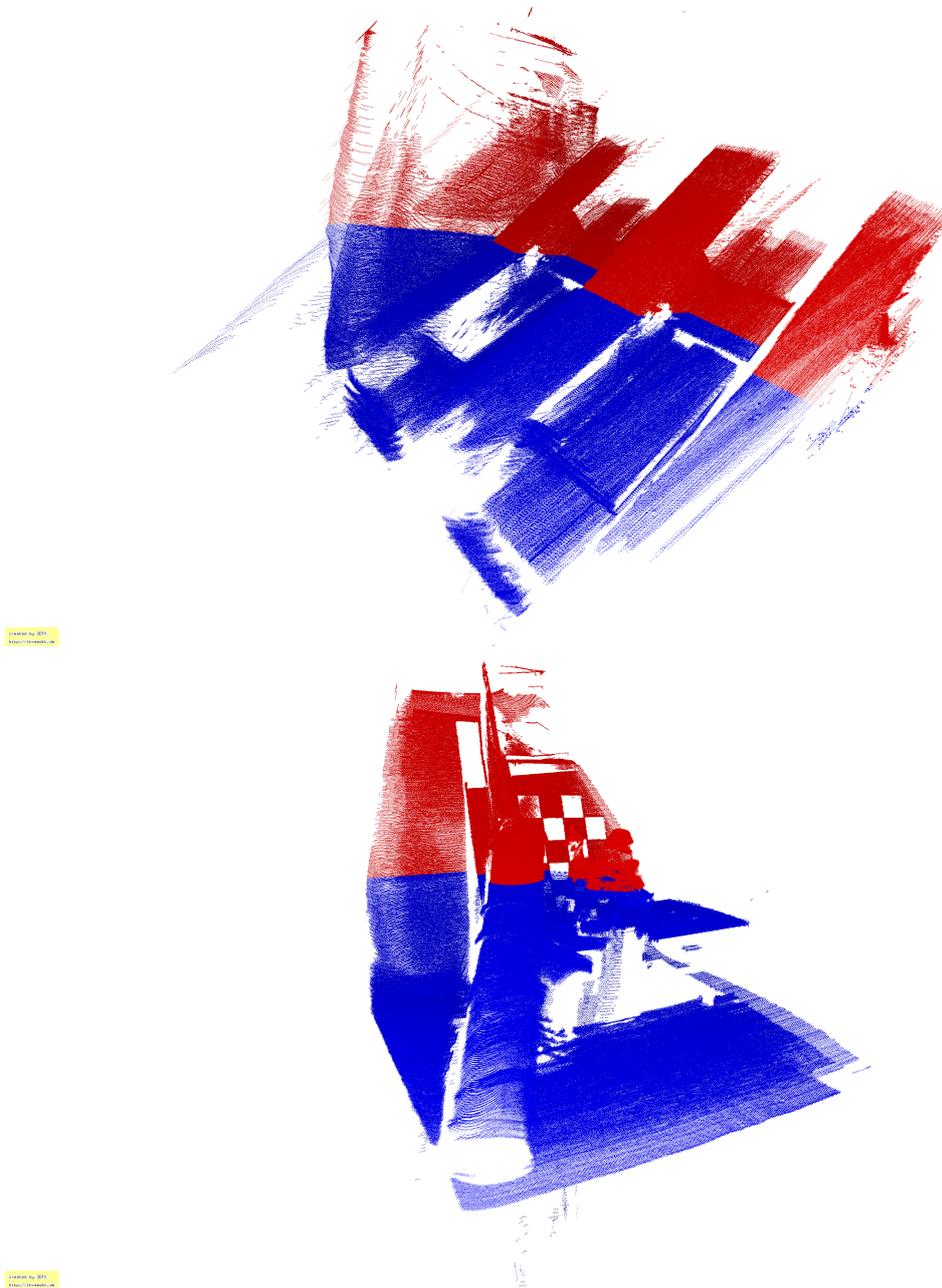


Abbildung 5.6: Die Abbildung zeigt oben den nicht korrigierten 3D-Scan der ersten Szene und unten den Scan der zweiten Szene. Bei beiden liegen die roten Punkte jeweils über und die blauen Punkte unterhalb der Wasseroberfläche. Eine Stauchung und Brechung ist in beiden deutlich sichtbar.

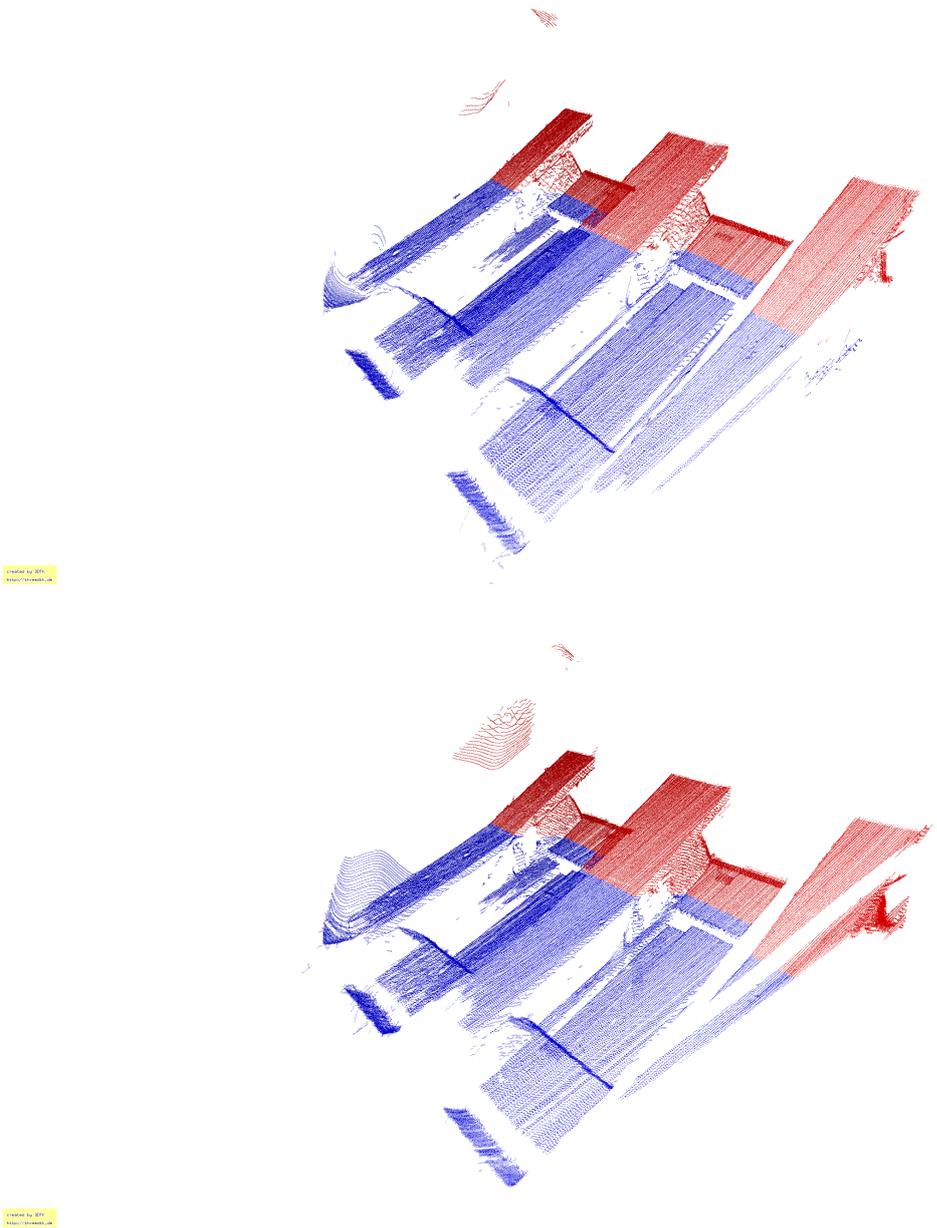


Abbildung 5.7: Die obere Abbildung zeigt den 3D-Scan der Palette mit einem Winkel von 0° zur Normalen der Wasseroberfläche. Die untere Abbildung wurde mit einem Winkel von 5° aufgezeichnet.

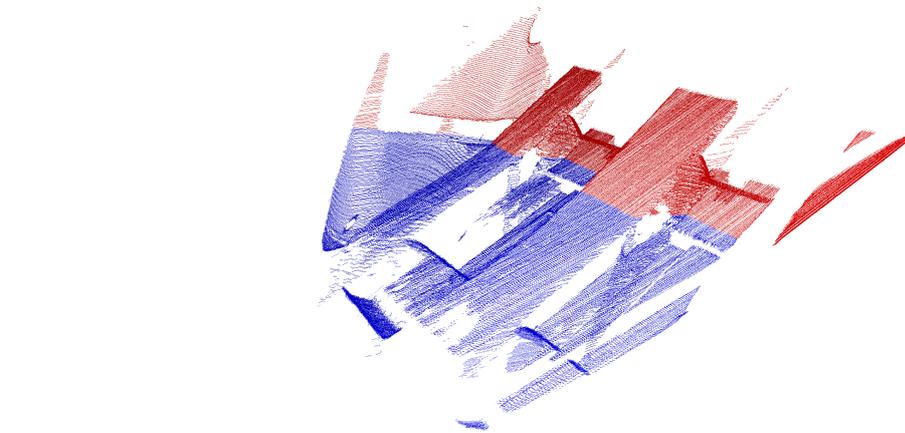
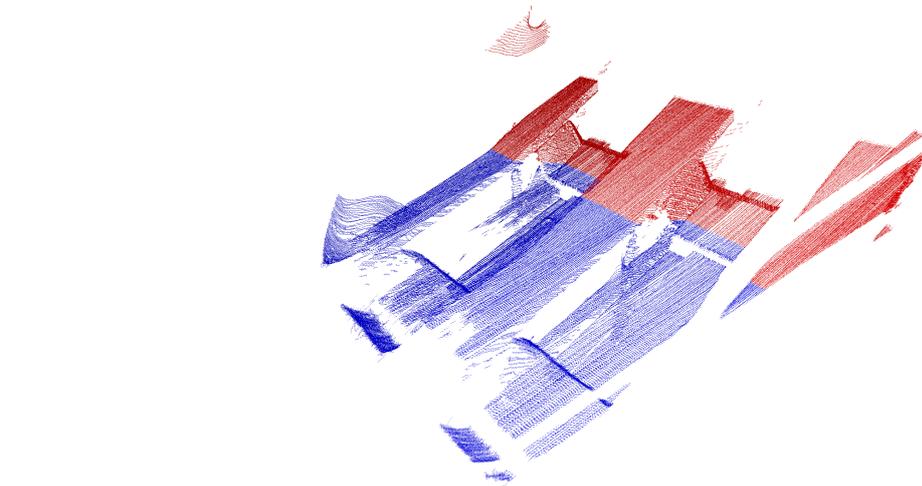


Abbildung 5.8: Die obere Abbildung zeigt den 3D-Scan der Palette mit einem Winkel von 10° zur Normalen der Wasseroberfläche. Die untere Abbildung wurde mit einem Winkel von 15° aufgezeichnet.

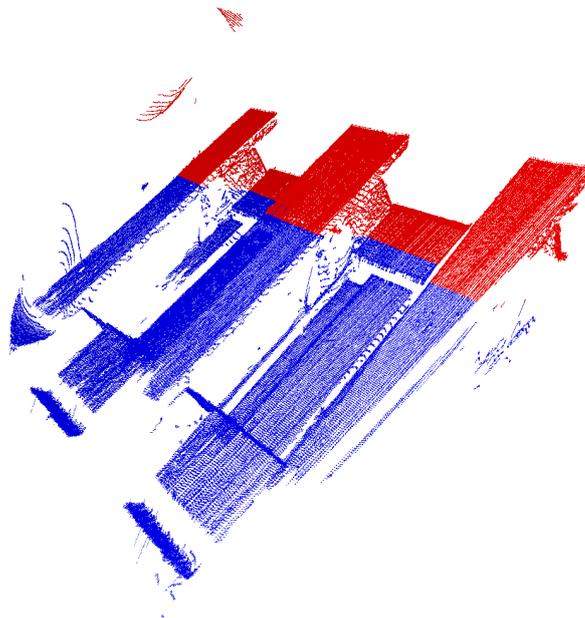
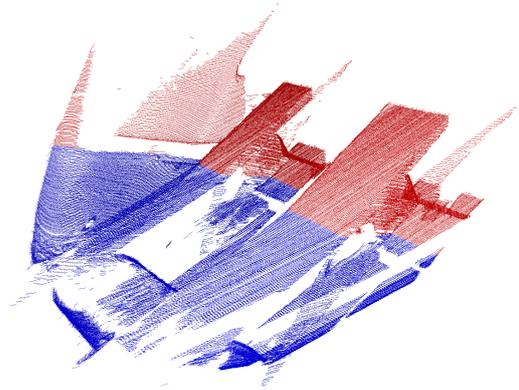


Abbildung 5.9: Die obere Abbildung zeigt den 3D-Scan der Palette mit einem Winkel von 20° zur Normalen der Wasseroberfläche. Die untere Abbildung zeigt den 3D-Scan nach der Korrektur.

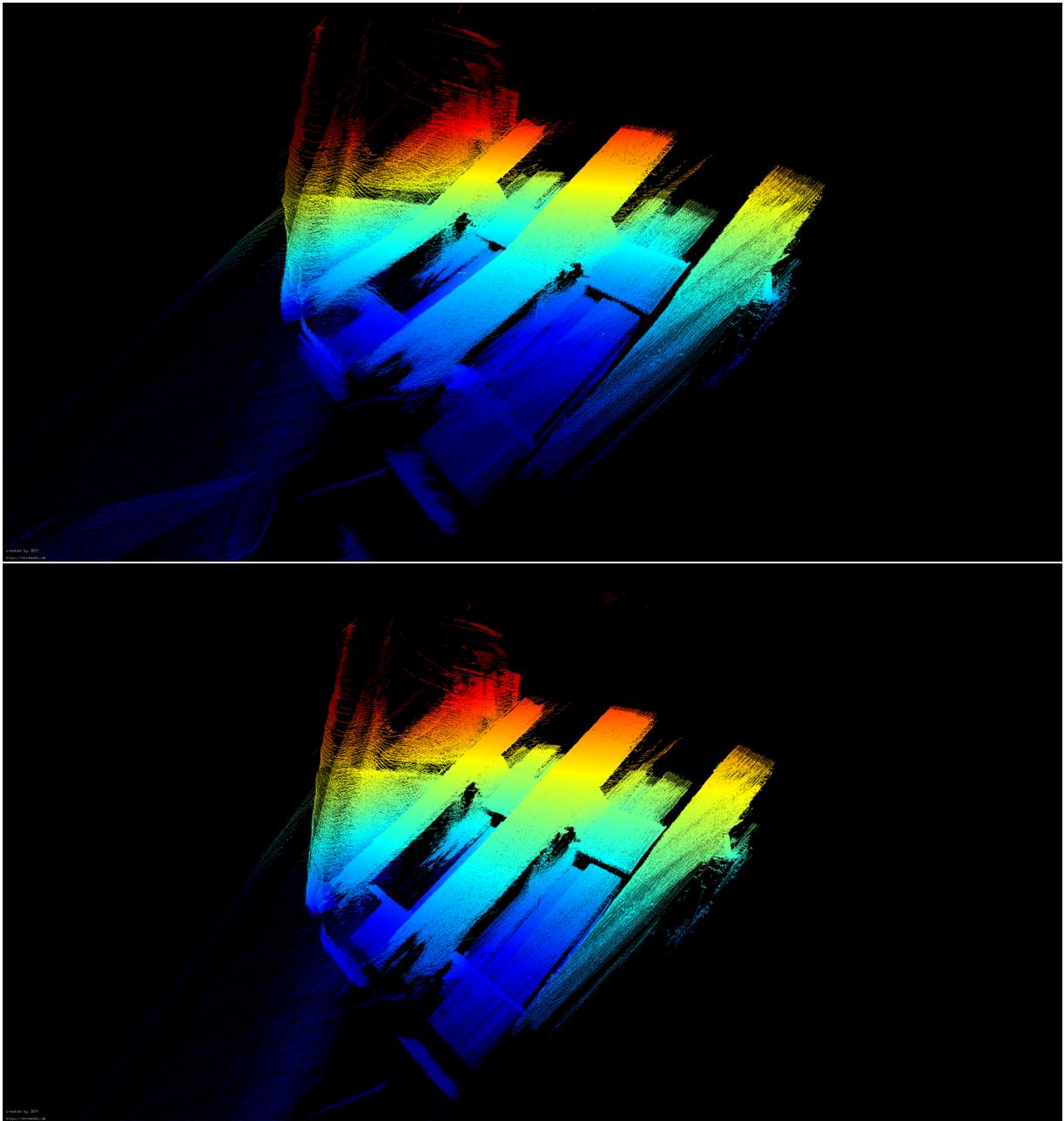


Abbildung 5.10: Diese beiden Abbildungen wurden nach der Höhe, von Blau zu Rot, eingefärbt. Oben sind alle Scans der fünf verschiedenen Winkel übereinander gelegt. Hierbei wird der Einfluss des Einstrahlwinkels sichtbar. An der linken unteren Ecke der oberen Abbildung ist zu sehen, wie sich für jeden Brechungswinkel der Boden des Tanks weiter nach oben biegt. Auch der Knick in den Brettern der Palette ist deutlich sichtbar. In der unteren Abbildung sind diese Fehler erkennbar reduziert. Die Bretter der Palette bilden eine Ebene und auch der Boden des Tanks liegt nun aufeinander.

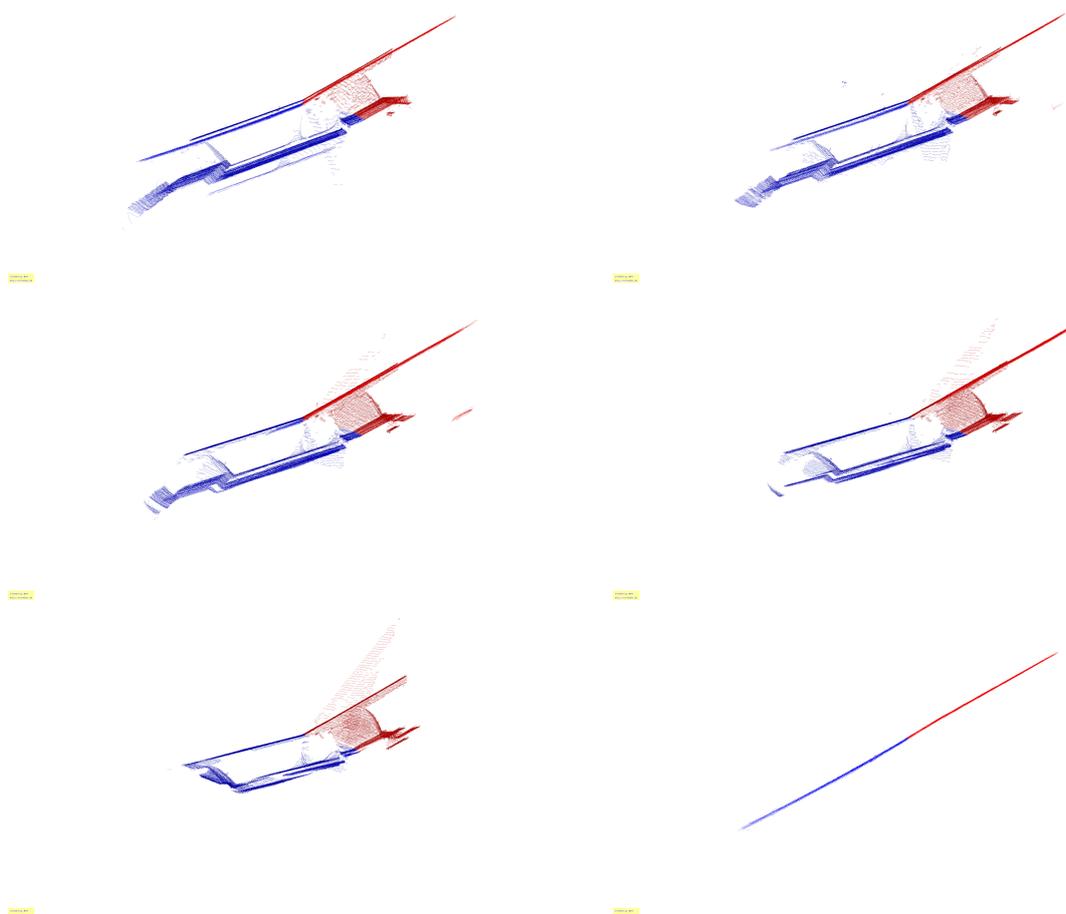
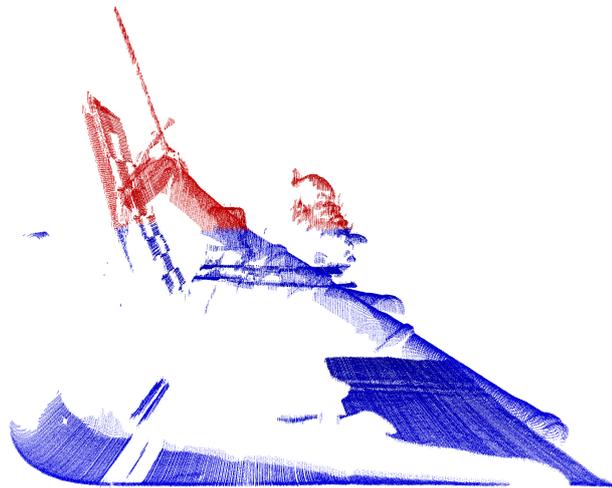
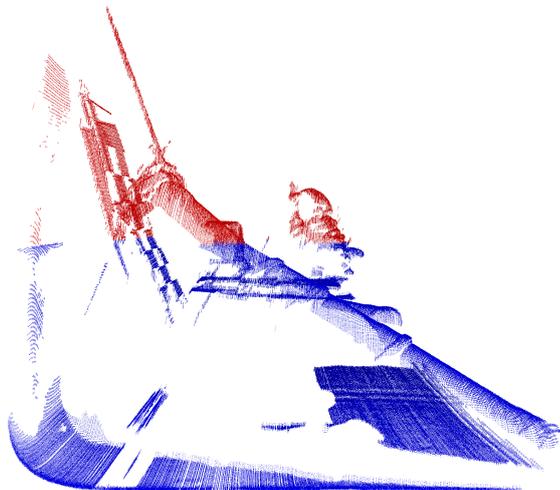


Abbildung 5.11: Diese Abbildung zeigt einen Querschnitt durch die Palette für jeden der fünf Winkelschritte, begonnen oben links. Die letzte Abbildung unten rechts zeigt hingegen einen Querschnitt durch die Palette nach der Korrektur. Ist in den ersten fünf, für jeden Winkelschritt, ein immer stärkerer Knick zwischen über und unter Wasser zu sehen, so konnte dieser in der letzten Abbildung nahezu vollständig korrigiert werden. Das Brett der Palette bildet gut sichtbar über und unter der Wasseroberfläche wieder eine Ebene.



© 2014 by 3D
www.3dscanner.com



© 2014 by 3D
www.3dscanner.com

Abbildung 5.12: Die obere Abbildung zeigt den 3D-Scan der zweiten Szene mit einem Winkel von 0° zur Normalen der Wasseroberfläche. Die untere Abbildung wurde mit einem Winkel von 5° aufgezeichnet.

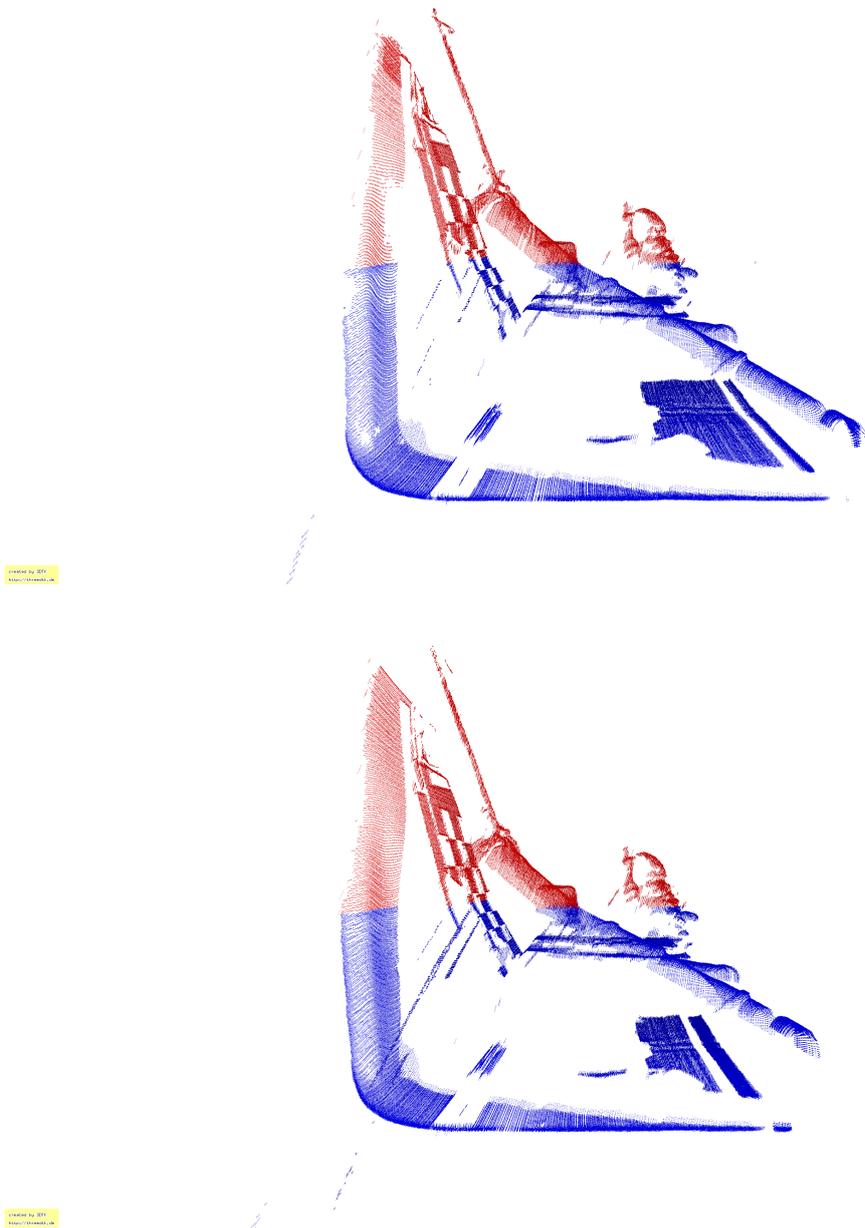


Abbildung 5.13: Die obere Abbildung zeigt den 3D-Scan der zweiten Szene mit einem Winkel von 10° zur Normalen der Wasseroberfläche. Die untere Abbildung wurde mit einem Winkel von 15° aufgezeichnet.

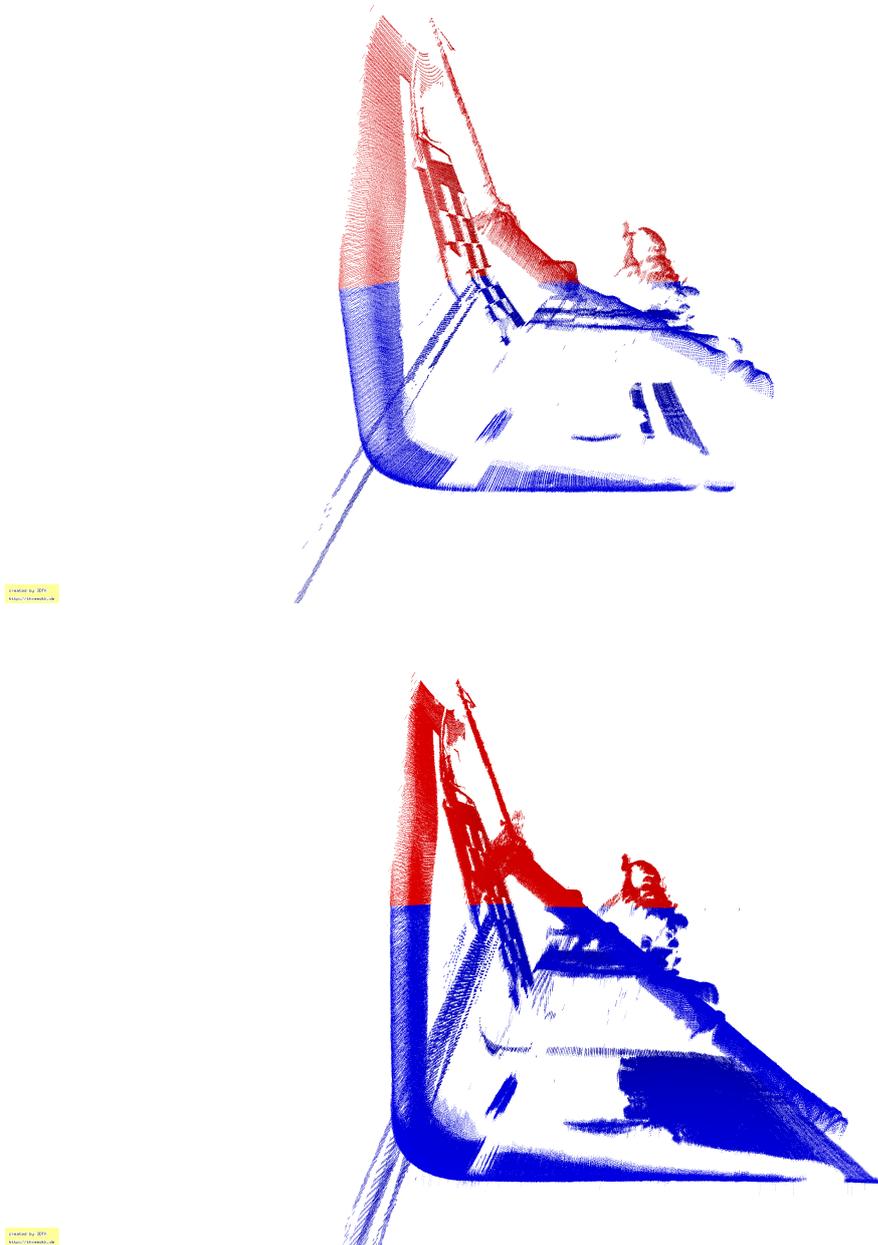


Abbildung 5.14: Die obere Abbildung zeigt den 3D-Scan der zweiten Szene mit einem Winkel von 20° zur Normalen der Wasseroberfläche. Die untere Abbildung zeigt die Szene nach der Korrektur, gerade im Bereich des Rohres und an der Gesamthöhe des Scans wird dies deutlich.

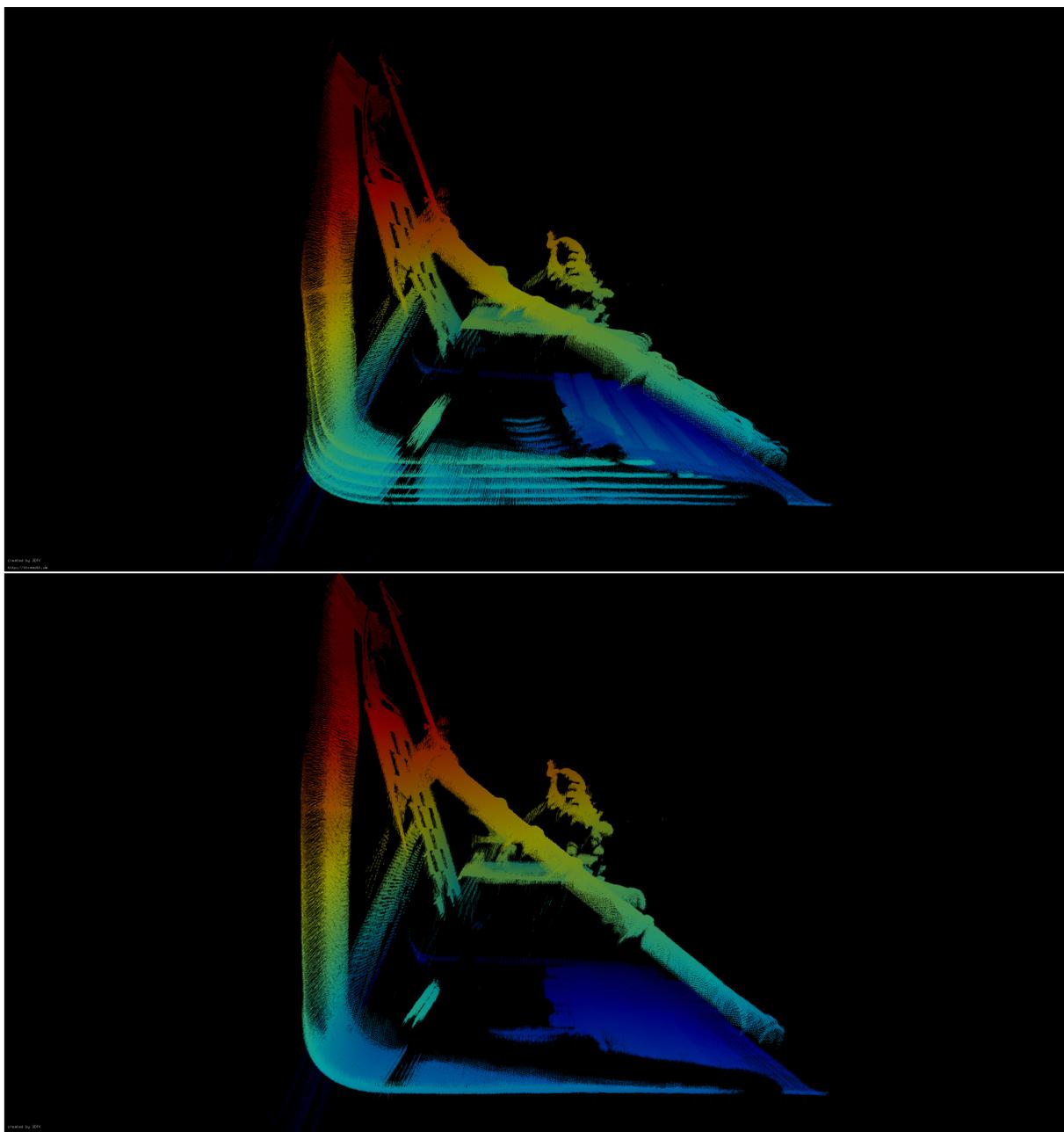


Abbildung 5.15: Diese beiden Abbildungen wurden nach der Höhe, von Blau zu Rot, eingefärbt. Oben sind alle Scans der fünf verschiedenen Winkel übereinander gelegt. Hierbei wird der Einfluss des Einstrahlwinkels deutlich, der Boden des Wassertanks, am unteren Ende des Scans, biegt sich immer weiter nach oben. Im korrigierten Scan, siehe untere Abbildung, bildet der Boden des Tanks eine Ebene, der Fehler durch die Brechungswinkel konnte deutlich sichtbar reduziert werden.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Zielsetzung der Arbeit war die Entwicklung einer Methode zur Korrektur der Brechung an der Wasseroberfläche beim triangulationsbasierten 3D-Laserscannen. Zu diesem Zweck wurde, unter Beachtung der Lichtbrechung, eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, mit einem LbSLS 3D-Daten von teilweise unter Wasser liegenden Strukturen anzufertigen und anschließend zu korrigieren. Daraufhin wurde diese Methode in einigen Experimenten getestet und die Ergebnisse ausgewertet. Um einen ersten Eindruck der Auswirkung unterschiedlicher Einstrahlwinkel auf die Wasseroberfläche zu bekommen, wurde der Scanner statisch vor einem Wassertank platziert und ein zur Hälfte versenktes planare Schachbrett betrachtet. Die Lage der Wasseroberfläche bezüglich der Kamera wurde hierbei durch ein weiteres Schachbrett bestimmt, das auf der Wasseroberfläche platziert wurde. Bereits hierbei wurde sowohl der Einfluss der unterschiedlichen Winkel sichtbar, als auch die Funktionalität der entwickelten Methode. Doch auch hierbei stellte sich bereits heraus, dass zukünftig ein Verfahren benötigt wird, das die Möglichkeit bietet die Position des Laserzentrums bezüglich der Kamera exakt zu bestimmen.

Nachdem die grundsätzliche Funktionalität sichergestellt war, wurden weitere Versuche durchgeführt. Da nun sowohl der Einfallswinkel auf die Wasseroberfläche, als auch eine komplexere Szene und nicht mehr nur eine einzelne Linie betrachtet wurde, musste der Scanner über dieser Szene definiert bewegt werden. Hierzu wurde der Scanner an einem KUKA KR-16 Manipulator befestigt, da dieser es ermöglicht, das System exakt und wiederholbar über einem Wassertank zu bewegen. Die Bewegung des Scanners und die Lage der Wasseroberfläche wurden hierbei durch ein externes Trackingsystem aufgezeichnet. Hierzu wurden zwei Marker am Scanner befestigt und mit einer Antastnadel die Wasseroberfläche an mehreren Punkten angetastet. Für die Versuche wurde zunächst bei 0° , somit senkrecht zur Wasseroberfläche, begonnen und dies in 5° Schritten bis auf 20° erhöht.

Während der Aufnahmen für die Experimente stellte sich heraus, dass bei entsprechender Belichtung der Kamera die Reflexionen der Laserlinie an der Wasseroberfläche dazu genutzt werden können, die Lage der Wasseroberfläche aus den aufgezeichneten Daten zu bestimmen. In einem Vergleich mit den Parametern der Wasseroberfläche, die aus dem Trackingsystem erstellt wurden, zeigt sich, dass die beiden Ebenen nahezu identisch sind. Der Winkel zwischen der Ebene

aus dem Trackingsystem und der aus dem Scan bestimmten Ebene beträgt lediglich $0,2074^\circ$.

Da es sich bei einer der Szenen um eine schräg im Wasser liegende Palette handelt, ermöglichte dies, die Oberfläche eines Balkens der Palette als Ebene zu betrachten. Somit wurde in den über und unter Wasser liegenden Teil eines Balkens je eine Ebene gelegt und der Winkel zwischen ihnen bestimmt. Der Winkel der beiden Ebenen lag dabei zwischen $10,04^\circ$ für 0° und $15,32^\circ$ für den größten Einfallswinkel von 20° . Dies ist in den 3D-Daten deutlich sichtbar und lässt die Szene unter Wasseroberfläche verzerrt und gestaucht wirken. Durch die Korrektur lies sich dieser Fehler auf $1,11^\circ$ reduzieren. Verglichen mit dem vorherigen Fehler ist dies ein gutes Ergebnis. Beim Betrachten des Scans sind nach der Korrektur visuell keine Fehler mehr zu erkennen. Sowohl der scheinbare Knick in geraden Objekten, als auch die Stauchung des gesamten Teils unterhalb der Wasseroberfläche sind fast vollständig korrigiert.

Durch die im Rahmen der Arbeit entwickelte Methode konnte die Brechung an der Wasseroberfläche bis auf einen geringen verbleibenden Fehler korrigiert werden. Ziel einer weiterführenden Arbeit könnte nun die exakte Analyse der verbleibenden Fehler und deren Ursachen sein. Es liegt nahe, dass ein großer Teil der Fehler durch die noch sehr aufwändige Kalibrierung entsteht. An diesem Punkt wäre es interessant weiter anzusetzen und dies zu optimieren und durch neue Verfahren zu verbessern. Einen ersten Ansatz bietet hier die Erkenntnis, dass es möglich ist, die Wasseroberfläche direkt aus den aufgezeichneten Daten des Scanners zu erhalten. Hier könnte untersucht werden, ob dies zu einer Minimierung des Fehlers führt, da so einen Fehlerquelle eliminiert werden würde. Da die Wasseroberfläche bisher mit dem Trackingsystem händisch eingemessen wurde, ebenso wie die Transformation zwischen der Kamera des Scanners und dem Trackingsystem. Solche händisch durchgeführten Kalibrierschritte führen unvermeidbar zu kleineren Fehlern, die sich schnell aufsummieren.

Als weitere wahrscheinliche Fehlerquelle wurde die Schätzung der Position des Laserzentrums bezüglich der Kamera erkannt. Eine exakte Analyse des Einflusses dieses Fehler auf das Gesamtergebnis wäre ebenfalls eine geeignete Fortführung. Bisher wurde das Projektionszentrum des Lasers lediglich grob geschätzt. Da dies jedoch ein wichtiger Bestandteil der Korrekturmethode ist, sollte auch hierfür ein exaktes Verfahren zur Kalibrierung entwickelt werden.

Ebenso könnten die Daten der im System verbauten IMU Einheiten verwendet werden, um die Trajektorie des Scanners zu verbessern. Weiter wären sicherlich unterschiedliche Trübungen des Wassers, sowie Salzgehalt etwas das sich zu untersuchen lohnt. Nachdem der Scanner mit einem entsprechenden System zur exakten Aufzeichnung der Trajektorie, unabhängig des externen Trackingsystems, versehen wurde, wären Feldtest das nächste interessante Experiment. Hierbei könnten weitere Schwachstellen des Systems und der Methode aufgedeckt und behoben werden.

Abkürzungsverzeichnis

AUV	Autonomous Underwater Vehicle
CW-LLS	Continuous Wave Laser Line Scanning
DEM	Digital Elevation Model
ICP	Iterative Closest Point
IMU	Inertial Measurement Unit
IS	Imaging Sonar
LiDAR	Light Detection and Ranging
LbSLS	Laser-Based Structured Light System
LLS	Laser Line Scanning
LS	Laser Stripe
MBS	Multibeam Sonar
Mod-LLS	Modulated Laser Line Scanning
PG-LLS	Pulse Gated Laser Line Scanning
PhS	Photometric Stereo
RMS	Root-Mean-Square
SBS	Single Beam Sonar
SfM	Structure from Motion
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
SL	Structured Light
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SSS	Sidescan Sonar
SURF	Speeded Up Robust Features

SV Stereo Vision

SVD Singulärwertzerlegung

ToF Time of Flight

UWTD Underwater Target Detection

Literaturverzeichnis

- [1] *3DTK - The 3D Toolkit*. <http://threedtk.de>
- [2] *AML Oceanographic*. <http://www.amloceanographic.com/CTD-Sound-Velocity-Environmental-Instrumentation-Home/Multibeam-Overview>
- [3] *EdgeTech*. <https://www.edgetech.com/underwater-technology-gallery/>
- [4] *Europäische Kommission*. http://europa.eu/rapid/press-release_IP-12-196_de.htm?locale=de. – Zugriff am 04. April 2016
- [5] *Radiale Verzeichnung*. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6708994>
- [6] *Renishaw - Optical encoders and LiDAR scanning*. <http://www.renishaw.com/en/optical-encoders-and-lidar-scanning--39244>
- [7] *Snelliussches Brechungsgesetz - Wikipedia*. https://de.wikipedia.org/wiki/Snelliussches_Brechungsgesetz
- [8] *VAMOS-Project*. <http://vamos-project.eu>. – Zugriff am 15. März 2016
- [9] ANDONO, Pulung N.; YUNIARNO, Eko M.; HARIADI, Mochamad; VENUS, Valentijn: 3D reconstruction of under water coral reef images using low cost multi-view cameras. In: *Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2012 International Conference on IEEE*, 2012
- [10] AYKIN, Murat D.; NEGAHDARIPOUR, Shahriar: Forward-look 2-D sonar image formation and 3-D reconstruction. In: *Oceans-San Diego, 2013 IEEE*, 2013
- [11] BARNARD, Stephen T.; FISCHLER, Martin A.: Computational stereo. In: *ACM Computing Surveys (CSUR)* 14 (1982), Nr. 4, S. 553–572
- [12] BEALL, Chris; LAWRENCE, Brian J.; ILA, Viorela; DELLAERT, Frank: 3D reconstruction of underwater structures. In: *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on IEEE*, 2010

- [13] BLEIER, Michael; NÜCHTER, Andreas: Low-Cost 3D Laser Scanning in Air or Water Using Self-Calibrating Structured Light. In: *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (2017), S. 105–112
- [14] BODENMANN, Adrian; THORNTON, Blair; HARA, Seiichi; HIOKI, Kazuyuki; KOJIMA, Mitsuhiro; URA, Tamaki; KAWATO, Masaru; FUJIWARA, Yoshihiro: Development of 8m long range imaging technology for generation of wide area colour 3D seafloor reconstructions. In: *Oceans, 2012 IEEE*, 2012
- [15] BODENMANN, Adrian; THORNTON, Blair; NAKAJIMA, Ryota; YAMAMOTO, Hiroyuki; URA, Tamaki: Wide area 3D seafloor reconstruction and its application to sea fauna density mapping. In: *Oceans-San Diego, 2013 IEEE*, 2013
- [16] BODENMANN, Adrian; THORNTON, Blair; NAKATANIY, Takeshi; URA, Tamaki: 3D colour reconstruction of a hydrothermally active area using an underwater robot. In: *OCEANS 2011 IEEE*, 2011
- [17] BORRMANN, Dorit; AFZAL, Hassan; ELSEBERG, Jan; NÜCHTER, Andreas: Mutual calibration for 3D thermal mapping. In: *IFAC Proceedings Volumes* 45 (2012), Nr. 22, S. 605–610
- [18] BRAHIM, Naouraz; GUÉRIOT, Didier; DANIEL, Sylvie; SOLAIMAN, Basel: 3D reconstruction of underwater scenes using DIDSON acoustic sonar image sequences through evolutionary algorithms. In: *OCEANS, 2011 IEEE-Spain IEEE*, 2011
- [19] BRANDOU, Vincent; ALLAIS, Anne-Gaelle; PERRIER, Michel; MALIS, E; RIVES, P; SARRAZIN, Jozee; SARRADIN, Pierre-Marie: 3D reconstruction of natural underwater scenes using the stereovision system iris. In: *OCEANS 2007-Europe Ieee*, 2007
- [20] BROWN, Myron Z.; BURSCHKA, Darius; HAGER, Gregory D.: Advances in computational stereo. In: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 25 (2003), Nr. 8, S. 993–1008
- [21] BRUNO, F; BIANCO, Gianfranco; MUZZUPAPPA, Maurizio; BARONE, Sandro; RAZIONALE, AV: Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66 (2011), Nr. 4, S. 508–518
- [22] BRUNO, Fabio; GALLO, Alessandro; DE FILIPPO, Francesco; MUZZUPAPPA, Maurizio; PETRIAGGI, Barbara D.; CAPUTO, Paolo: 3D documentation and monitoring of the experimental cleaning operations in the underwater archaeological site of Baia (Italy). In: *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, 2013 Bd. 1 IEEE, 2013

- [23] BUTLER, Justin; LANE, Stuart; CHANDLER, Jim; PORFIRI, Ekaterini: Through-water close range digital photogrammetry in flume and field environments. In: *The Photogrammetric Record* 17 (2002), Nr. 99, S. 419–439
- [24] CADALLI, Nail; SHARGO, Peter J.; MUNSON JR, David C.; SINGER, Andrew C.: 3-D tomographic imaging of ocean mines from real and simulated lidar returns. In: *Proceedings of SPIE* Bd. 4488, 2002
- [25] COCHENOUR, Brandon; MULLEN, Linda; MUTH, John: Modulated pulse laser with pseudorandom coding capabilities for underwater ranging, detection, and imaging. In: *Applied Optics* 50 (2011), Nr. 33, S. 6168–6178
- [26] COCITO, S; SGORBINI, S; PEIRANO, A; VALLE, M: 3-D reconstruction of biological objects using underwater video technique and image processing. In: *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 297 (2003), Nr. 1, S. 57–70
- [27] COIRAS, Enrique; PETILLOT, Yvan; LANE, David M.: Multiresolution 3-D reconstruction from side-scan sonar images. In: *IEEE Transactions on Image Processing* 16 (2007), Nr. 2, S. 382–390
- [28] DALGLEISH, Fraser R.; CAIMI, Frank M.; BRITTON, Walter B.; ANDREN, Carl F.: Improved LLS imaging performance in scattering-dominant waters. In: *Proc. SPIE* Bd. 7317, 2009
- [29] DHOND, Umesh R.; AGGARWAL, Jake K.: Structure from stereo—a review. In: *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics* 19 (1989), Nr. 6, S. 1489–1510
- [30] DOMINICIS, Luigi de; FORNETTI, G; GUARNERI, M; COLLIBUS, M F.; FRANCUCCI, M; NUOLI, M; AL-OBAYDI, A; MCSTAY, D u. a.: Structural Monitoring Of Offshore Platforms By 3d Subsea Laser Profilers. In: *Offshore Mediterranean Conference and Exhibition* Offshore Mediterranean Conference, 2013
- [31] FRYER, JG; KNIEST, HT: Errors in depth determination caused by waves in through-water photogrammetry. In: *The Photogrammetric Record* 11 (1985), Nr. 66, S. 745–753
- [32] GENG, Jason: Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. In: *Advances in Optics and Photonics* 3 (2011), Nr. 2, S. 128–160
- [33] GORDON, Alan: Use of laser scanning system on mobile underwater platforms. In: *Autonomous Underwater Vehicle Technology, 1992. AUV'92., Proceedings of the 1992 Symposium on IEEE, 1992*
- [34] GUO, Yinbin: 3D underwater topography rebuilding based on single beam sonar. In: *Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC), 2013 IEEE International Conference on IEEE, 2013*

-
- [35] HARTLEY, R. I.; ZISSERMAN, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Second. Cambridge University Press, 2004. – ISBN 0521540518
- [36] HILDEBRANDT, Marc; KERDELS, Jochen; ALBIEZ, Jan; KIRCHNER, Frank: A practical underwater 3D-Laserscanner. In: *OCEANS 2008 IEEE*, 2008
- [37] HILLDALE, Robert C.; RAFF, David: Assessing the ability of airborne LiDAR to map river bathymetry. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 33 (2008), Nr. 5, S. 773–783
- [38] HOGUE, Andrew; GERMAN, Andrew; JENKIN, Michael: Underwater environment reconstruction using stereo and inertial data. In: *Systems, Man and Cybernetics, 2007. ISIC. IEEE International Conference on IEEE*, 2007
- [39] HURTÓS, N; CUFI, X; SALVI, J: Calibration of optical camera coupled to acoustic multibeam for underwater 3D scene reconstruction. In: *OCEANS 2010 IEEE-Sydney IEEE*, 2010
- [40] INGLIS, Gabrielle; ROMAN, Chris: Sonar constrained stereo correspondence for three-dimensional seafloor reconstruction. In: *OCEANS 2010 IEEE-Sydney IEEE*, 2010
- [41] INGLIS, Gabrielle; SMART, Clara; VAUGHN, Ian; ROMAN, Chris: A pipeline for structured light bathymetric mapping. In: *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on IEEE*, 2012
- [42] IRISH, Jennifer L.; LILLYCROP, W J.: Scanning laser mapping of the coastal zone: The SHOALS system. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 (1999), Nr. 2, S. 123–129
- [43] JASIOBEDZKI, Piotr; SE, Stephen; BONDY, Michel; JAKOLA, Roy: Underwater 3D mapping and pose estimation for ROV operations. In: *OCEANS 2008 IEEE*, 2008
- [44] JORDT-SEDLAZECK, Anne; KOCH, Reinhard: Refractive structure-from-motion on underwater images. In: *Proceedings of the IEEE international Conference on Computer Vision*, 2013
- [45] KLOPFER, Florian; HÄMMERLE, Martin; HÖFLE, Bernhard: Assessing the Potential of a Low-Cost 3-D Sensor in Shallow-Water Bathymetry. In: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* (2017)
- [46] KONDO, Hayato; MAKI, TOSHIHIRO; URA, TAMAKI; NOSE, Yoshiaki; SAKAMAKI, T; INAISHI, M: Structure tracing with a ranging system using a sheet laser beam. In: *Underwater Technology, 2004. UT'04. 2004 International Symposium on IEEE*, 2004

- [47] KUMAR, N S.; KUMAR, Ramakanth: Design & development of autonomous system to build 3D model for underwater objects using stereo vision technique. In: *India Conference (INDICON), 2011 Annual IEEE IEEE*, 2011
- [48] LIU, JunJie; JAKAS, Anthony; AL-OBAIDI, Ala; LIU, Yonghuai: Practical issues and development of underwater 3D laser scanners. In: *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2010 IEEE Conference on IEEE*, 2010
- [49] MASSOT, M; OLIVER, G; KEMAL, H; PETILLOT, Y; BONIN-FONT, F: Structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction. In: *Proceedings of the MTS/IEEE Oceans, Genoa, Italy (2015)*, S. 18–21
- [50] MASSOT-CAMPOS, Miquel; OLIVER-CODINA, Gabriel: Optical sensors and methods for underwater 3D reconstruction. In: *Sensors 15 (2015)*, Nr. 12, S. 31525–31557
- [51] MCKINNON, David; HE, Hu; UPCROFT, Ben; SMITH, Ryan N.: Towards automated and in-situ, near-real time 3-D reconstruction of coral reef environments. In: *OCEANS 2011 IEEE*, 2011
- [52] MCLEOD, Dan; JACOBSON, John; HARDY, Mark; EMBRY, Carl: Autonomous inspection using an underwater 3D LiDAR. In: *Oceans-San Diego, 2013 IEEE*, 2013
- [53] MELINE, Arnaud; TRIBOULET, Jean; JOUVENCEL, Bruno: Comparative study of two 3D reconstruction methods for underwater archaeology. In: *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on IEEE*, 2012
- [54] MOORE, Karl D.; JAFFE, Jules S.: Time-evolution of high-resolution topographic measurements of the sea floor using a 3-D laser line scan mapping system. In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering 27 (2002)*, Nr. 3, S. 525–545
- [55] MOORE, Karl D.; JAFFE, Jules S.; OCHOA, Benjamin L.: Development of a new underwater bathymetric laser imaging system: L-bath. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 17 (2000)*, Nr. 8, S. 1106–1117
- [56] MULLEN, Linda; CONTARINO, V M.; LAUX, Alan; CONCANNON, Brian; DAVIS, Jon: Modulated laser line scanner for enhanced underwater imaging / Naval air warfare center. 1998. – Forschungsbericht
- [57] MULLEN, Linda J.; CONTARINO, V M.: Hybrid lidar-radar: seeing through the scatter. In: *IEEE Microwave magazine 1 (2000)*, Nr. 3, S. 42–48
- [58] MULLEN, Linda J.; VIEIRA, Amarildo J.; HERZFELD, PR; CONTARINO, Vincent M.: Application of RADAR technology to aerial LIDAR systems for enhancement of shallow underwater target detection. In: *IEEE Transactions on microwave theory and techniques 43 (1995)*, Nr. 9, S. 2370–2377

- [59] NAKATANI, Takeshi; LI, Shuhao; URA, Tamaki; BODENMANN, Adrian; SAKAMAKI, Takashi: 3D visual modeling of hydrothermal chimneys using a rotary laser scanning system. In: *Underwater Technology (UT), 2011 IEEE Symposium on and 2011 Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (SSC)* IEEE, 2011
- [60] NARASIMHAN, Srinivasa G.; NAYAR, Shree K.: Structured light methods for underwater imaging: light stripe scanning and photometric stereo. In: *OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE* IEEE, 2005
- [61] NEGAHDARIPOUR, Shahriar; SEKKATI, Hicham; PIRSIYAVASH, Hamed: Opti-acoustic stereo imaging: On system calibration and 3-D target reconstruction. In: *IEEE Transactions on image processing* 18 (2009), Nr. 6, S. 1203–1214
- [62] NICOSEVICI, Tudor; GRACIAS, Nuno; NEGAHDARIPOUR, Shahriar; GARCIA, Rafael: Efficient three-dimensional scene modeling and mosaicing. In: *Journal of Field Robotics* 26 (2009), Nr. 10, S. 759–788
- [63] OLSON, Edwin: AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system. In: *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on* IEEE, 2011
- [64] OZOG, Paul; CARLEVARIS-BIANCO, Nicholas; KIM, Ayoung; EUSTICE, Ryan M.: Long-term Mapping Techniques for Ship Hull Inspection and Surveillance using an Autonomous Underwater Vehicle. In: *Journal of Field Robotics* 33 (2016), Nr. 3, S. 265–289
- [65] PALOMER, Albert; RIDAO, Pere; RIBAS, David; FOREST, Josep: Underwater 3D Laser Scanners: The Deformation of the Plane. In: *Sensing and Control for Autonomous Vehicles*. Springer, 2017, S. 73–88
- [66] PATHAK, Kaustubh; BIRK, Andreas; VASKEVICIUS, Narunas: Plane-based registration of sonar data for underwater 3D mapping. In: *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on* IEEE, 2010
- [67] PELLEEN, Fabrice; JEZEQUEL, Vincent; ZION, Guy; LE JEUNE, Bernard: Detection of an underwater target through modulated lidar experiments at grazing incidence in a deep wave basin. In: *Applied optics* 51 (2012), Nr. 31, S. 7690–7700
- [68] PIZARRO, Oscar; EUSTICE, Ryan M.; SINGH, Hanumant: Large area 3-D reconstructions from underwater optical surveys. In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 34 (2009), Nr. 2, S. 150–169
- [69] PRATS, Mario; FERNÁNDEZ, José J; SANZ, Pedro J.: An approach for semi-autonomous recovery of unknown objects in underwater environments. In: *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2012 13th International Conference on* IEEE, 2012

- [70] REINEMAN, Benjamin D.; LENAIN, Luc; CASTEL, David; MELVILLE, W K.: A portable airborne scanning lidar system for ocean and coastal applications. In: *Journal of Atmospheric and oceanic technology* 26 (2009), Nr. 12, S. 2626–2641
- [71] ROMAN, Chris; INGLIS, Gabrielle; RUTTER, James: Application of structured light imaging for high resolution mapping of underwater archaeological sites. In: *OCEANS 2010 IEEE-Sydney* IEEE, 2010
- [72] ROSENBLUM, Lawrence; KAMGAR-PARSI, Behzad: 3D reconstruction of small underwater objects using high-resolution sonar data. In: *Autonomous Underwater Vehicle Technology, 1992. AUV'92., Proceedings of the 1992 Symposium on* IEEE, 1992
- [73] RUMBAUGH, Luke K.; BOLLT, Erik M.; JEMISON, William D.; LI, Yifei: A 532 nm chaotic lidar transmitter for high resolution underwater ranging and imaging. In: *Oceans-San Diego, 2013* IEEE, 2013
- [74] SALVI, Joaquim; FERNANDEZ, Sergio; PRIBANIC, Tomislav; LLADO, Xavier: A state of the art in structured light patterns for surface profilometry. In: *Pattern recognition* 43 (2010), Nr. 8, S. 2666–2680
- [75] SARAFRAZ, Amin; HAUS, Brian K.: A structured light method for underwater surface reconstruction. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 114 (2016), S. 40–52
- [76] SAYLAM, Kutalmis; BROWN, Rebecca A.; HUPP, John R.: Assessment of depth and turbidity with airborne Lidar bathymetry and multiband satellite imagery in shallow water bodies of the Alaskan North Slope. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 58 (2017), S. 191–200
- [77] SCHARSTEIN, Daniel; SZELISKI, Richard: A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. In: *International journal of computer vision* 47 (2002), Nr. 1-3, S. 7–42
- [78] SCHMIDT, Val E.; RZHANOV, Yuri: Measurement of micro-bathymetry with a GOPRO underwater stereo camera pair. In: *Oceans, 2012* IEEE, 2012
- [79] SEDLAZECK, Anne; KOSER, Kevin; KOCH, Reinhard: 3d reconstruction based on underwater video from roV kiel 6000 considering underwater imaging conditions. In: *OCEANS 2009-EUROPE* IEEE, 2009
- [80] SEITZ, Steven M.; CURLESS, Brian; DIEBEL, James; SCHARSTEIN, Daniel; SZELISKI, Richard: A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. In: *Computer vision and pattern recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on* Bd. 1 IEEE, 2006

-
- [81] SERVOS, James; SMART, Michael; WASLANDER, Steven L.: Underwater stereo SLAM with refraction correction. In: *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on IEEE*, 2013
- [82] SMITH, Mark; VERICAT, Damia; GIBBINS, Chris: Through-water terrestrial laser scanning of gravel beds at the patch scale. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 37 (2012), Nr. 4, S. 411–421
- [83] SÖDERKVIST, Inge: Using SVD for some fitting problems. In: *University Lecture* (2009)
- [84] STEGER, Carsten: An unbiased detector of curvilinear structures. In: *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 20 (1998), Nr. 2, S. 113–125
- [85] TETLOW, Stephen; SPOURS, John: Three-dimensional measurement of underwater work sites using structured laser light. In: *Measurement Science and Technology* 10 (1999), Nr. 12, S. 1162
- [86] TÖRNBLOM, Nils: *Underwater 3D Surface Scanning Using Structured Light*. 2010
- [87] TSIOTSIOS, Chourmouzos; ANGELOPOULOU, Maria E.; KIM, Tae-Kyun; DAVISON, Andrew J.: Backscatter compensated photometric stereo with 3 sources. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014
- [88] WANG, Chi-Kuei; PHILPOT, William D.: Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters. In: *Remote Sensing of Environment* 106 (2007), Nr. 1, S. 123–135
- [89] WU, Lun; GANESH, Arvind; SHI, Boxin; MATSUSHITA, Yasuyuki; WANG, Yongtian; MA, Yi: Robust photometric stereo via low-rank matrix completion and recovery. In: *Asian Conference on Computer Vision* Springer, 2010
- [90] YANG, Yu; ZHENG, Bing; ZHENG, Hai-yong; WANG, Zi-tao; WU, Guo-shuai; WANG, Jin-cheng: 3D reconstruction for underwater laser line scanning. In: *OCEANS-Bergen, 2013 MTS/IEEE IEEE*, 2013
- [91] ZHANG, Qican; WANG, Qingfeng; HOU, Zhiling; LIU, Yuankun; SU, Xianyu: Three-dimensional shape measurement for an underwater object based on two-dimensional grating pattern projection. In: *Optics & Laser Technology* 43 (2011), Nr. 4, S. 801–805
- [92] ZHANG, Z: A flexible new technique for camera calibration. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22 (2000), November, Nr. 11, S. 1330–1334

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Würzburg, November 2017