

Untersuchung der Messeigenschaften des Unterwasser Laserscanners ULi in unterschiedlichen Temperaturbereichen als Grundlage für kombiniertes Unterwassermonitoring

Ellen HEFFNER¹ (0000-0002-0823-0893), Clemens SEMMELROTH² (0009-0000-4718-911X) & Harald STERNBERG³ (0000-0002-1905-2287)

¹ HafenCity Universität Hamburg, ellen.heffner@hcu-hamburg.de (corresponding Author)

^{2, 3} HafenCity Universität Hamburg

DOI: [10.3217/978-3-99161-070-0-010](https://doi.org/10.3217/978-3-99161-070-0-010), CC BY 4.0

1 Kurzfassung

Im Bereich Deformationsmonitoring und Schadensbegutachtung gibt es bisher nur wenige Ansätze für präzise Methoden unter Wasser. Akustische Sensoren eignen sich auf Grund ihrer limitierten Auflösung im Zentimeterbereich nur für großskalige Schadensdetektionen, optische Messmethoden hingegen versprechen eine detailreichere Auflösung. Das neuartige Underwater LiDAR System ULi bietet eine aktive optische Messmethode in Form eines Unterwasser Laserscanners zur 3D-Erfassung von Unterwasserstrukturen. Mit bis zu 100.000 Messpunkten pro Sekunde ist ULi vergleichbar zu terrestrischen Laserscannern und bietet das Potenzial für hochaufgelöstes Zustandsmonitoring von z.B. Unterwasserbauwerken. Inwiefern sich ULi auch für den kombinierten Einsatz mit einem verteilten faseroptischen Messsystem (DFOS) für Deformationsmonitoring eignet, wird in diesem Beitrag untersucht.

Zu diesem Zweck werden zunächst Messungen in einer kontrollierten Laborumgebung durchgeführt, um die temperaturbedingten Messeigenschaften der Sensorik zu untersuchen. Damit verifiziert dieser Beitrag die optischen Brechungsindizes aus der Literatur anhand empirischer Untersuchungen in unterschiedlichen Temperaturbereichen für einen Unterwasser Laserscanner. Es lässt sich eine temperaturunabhängige Messpräzision in den Punktwolken im Submillimeterbereich nachweisen ($\pm 0,6$ mm), jedoch verbleibt ein temperaturbedingter Tiefenfehler im Millimeterbereich, welcher noch nicht einwandfrei erklärt werden kann. Im Anschluss wird untersucht, inwiefern ULi zur Deformationsdetektion geeignet ist. Hierzu werden flächige Messungen auf eine Hartplastikplatte durchgeführt, welche in einzelnen Schritten kontrolliert deformiert wird. Zudem wird die Messvorrichtung mit terrestrischen Scanmethoden in Ausgangs- und Deformationslage als Vergleichsmessungen erfasst. Es lassen sich in allen Temperaturzuständen eindeutig Deformationen von weniger als einem Zentimeter mit einer mittleren Genauigkeit von 0,7 mm beobachten. Somit eignet sich ULi als Sensorik für Unterwassermonitoring, insbesondere als Ergänzung zu und im kombinierten Einsatz mit kontinuierlichen Messverfahren.

2 Motivation und Zielsetzung

Das präzise und hochaufgelöste Beobachten von Wasserbauwerken wie Hafenanlagen und Brückenbauwerken ist seit Jahrzehnten Gegenstand geodätischer Forschung. Um Deformationen auch unterhalb der Wasserkante monitoren zu können, kommen dabei kontinuierliche Messverfahren wie Stangenextensometer und Inklinometer zum Einsatz. Die Hamburg Port Authority setzt zudem Inklinometerwagen ein, um die Neigungen und Verschiebungen von Stahlspundwänden präzise zu erfassen (FEINDT & JESSEN 2024). Darüber hinaus wurde eine Pilotstudie für den Einsatz von Faseroptischen Sensoren (FOS) im Hamburger Hafen vorgestellt, welche zeigt, dass FOS grundsätzlich für das Unterwassermonitoring von Kaimauern eingesetzt werden können (SCHEIDER et al. 2023). SEMMELROTH et al. (2025) entwerfen darauf aufbauend ein Messkonzept unter Einsatz eines verteilten Faseroptischen Messsystems (DFOS) mithilfe verteilter Dehnungs- und Temperaturmessung für ein Structural Health Monitoring der Kaimauern. Anstelle dieser kontinuierlichen Messmethoden kommen für räumlich hoch aufgelöste Analysen jedoch nur direkte 3D Messungen in Frage: unter Wasser werden 3D Daten mittels Fächerecholotsystemen oder mit photogrammetrischen Methoden erhoben (z.B. JOST et al. 2025). Die Verwendung von Fächerecholotsystemen eignet sich für die Detektion von vertikalen Objekten von mindestens fünf Zentimetern Größe und bieten eine Auflösung abhängig von der Aufzeichnungsentfernung von den Hafenanlagen im Zentimeter Bereich (ZHU et al. 2020). Damit können großskalige Deformationen von Wasserbauwerken im Dezimeter Bereich detektiert werden (RONDEAU & PELLETIER 2013). Eine detailreichere Auflösung versprechen hingegen optische Messmethoden, wobei die Unterwasser Photogrammetrie als passive Messmethode stark von den Sichtverhältnissen unter Wasser limitiert ist. Vielversprechend werden deshalb aktive Lasermessmethoden durch Unterwasser Laserscanner beschrieben, welche ein Präzisions- und Auflösungsvermögen im Millimeterbereich ermöglichen (z.B. WERNER et al. 2023, NIEMEYER et al. 2019).

Der vom Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik (IPM) entwickelte Underwater LiDAR System ULi ist ein Unterwasser Laserscanner basierend auf der Time-of-Flight (ToF) Messmethode mittels eines grünen gepulsten Lasers. Bisherige Untersuchungen zu ULi fanden ausschließlich in Süßwasser unter verschiedenen Trübungsbedingungen statt (HEFFNER et al. 2025, WALTER et al. 2025, WERNER et al. 2023). Diese Versuche zeigten vergleichbare Punktwolken Qualitäten zu terrestrischen Laserscannern auf kurze Messdistanzen, obwohl das Medium Wasser deutliche Herausforderungen an optische Messmethoden stellt. Der Einfluss von Temperatur und Salzgehalt im Wasser wurde jedoch bis dato nicht untersucht. Um das Potential nun für Unterwassermonitoring von Bauwerken in z.B. Häfen bewerten zu können, fehlen Analysen in salzhaltigem Wasser und zu unterschiedlichen Temperaturzuständen.

Dieser Beitrag möchte einen Überblick über den Einfluss von Temperatur und Salzgehalt im Wasser auf die Messergebnisse eines Unterwasser Laserscanner geben. Dafür werden die theoretischen Brechungsindizes anhand empirischer Untersuchungen in unterschiedlichen Temperaturbereichen verifiziert und somit der Einfluss der Wassertemperatur auf die Punktwolke quantifiziert. Anschließend wird untersucht, inwiefern ULi zur Detektion von Deformationen im Millimeterbereich quer zur Objektoberfläche geeignet ist. Auf dieser Basis kann ULi auf Genauigkeit und Praktikabilität für Unterwassermonitoring bewertet werden.

3 Einfluss von Temperatur und Salzgehalt im Wasser

In der Berechnung der Punktwolke eines ToF-Lidar kommen ähnliche geometrische Modelle zum Einsatz wie in der Mehrmedienphotogrammetrie (MAAS 2014). Diese Modelle berücksichtigen die Brechung im Strahlverlauf des Laserlichts am Übergang von Luft zu Glas (im Inneren der Scanner-Einheit) und von Glas zu Wasser (bzw. dem Zielmedium). Aus der Richtungsänderung am Übergang von zwei Medien resultiert eine radiale Verzerrung der abgebildeten Punktwolke nach dem Brechungsgesetz von Snellius, falls dieser Effekt nicht mit Hilfe korrekter Brechungsindizes der jeweiligen Medien korrigiert wird. Neben der Richtung ändert sich im Wasser auch Ausbreitungsgeschwindigkeit von Laserpulsen abhängig von den Dichteigenschaften des Mediums. Generell gilt: je dichter das Medium, desto langsamer die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Und aus einer veränderten Ausbreitungsgeschwindigkeit resultiert ein potentieller Tiefenfehler. Daher ist die Kenntnis und korrekte Anbringung der Brechungsindizes von großer Bedeutung für eine korrekt abgebildete 3D Punktwolke.

Häufig wird der Brechungsindex im Wasser mit 1,33 angegeben, daraus leitet sich mittels der Lichtgeschwindigkeit in der Luft eine Ausbreitungsgeschwindigkeit im Wasser von ca. $2,25 \cdot 10^8$ m/s ab. Der Brechungsindex im Wasser hängt aber sowohl von den Eigenschaften des Wassers (Temperatur, Salinität und Druck) als auch von der Wellenlänge des verwendeten Lasers ab. Für die Berechnung des Brechungsindex des Wassers finden sich in der Literatur empirischen Formeln. Eine gängige Berechnung erfolgt nach HÖHLE (1971):

$$n_w = 1,338 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot (486 - \lambda - T + 0,003 \cdot D + 5 \cdot S) \quad (1)$$

mit

- n_w : Brechungsindex Wasser
- λ : Wellenlänge des Lasers in [nm]
- T : Temperatur im Wasser in [°C]
- D : Messdistanz im Wasser in [m]
- S : Salinität im Wasser in ‰

Eine neuere Modellierung des Brechungsindex im Wasser nach PARRISH (2020) bezieht in die Funktion lediglich Wellenlänge und Temperatur ein und interpoliert die Salinität linear zwischen Süßwasser und Meerwasser (Salzgehalt von 35 ‰). Die beiden empirischen Ansätze (Höhle und Parrish) unterscheiden sich für Berechnungen der Brechungsindizes eines grünen Lasers (Wellenlänge von 532 nm) bei 21 ‰ salinen Wasser in der vierten Nachkommastelle.

In wie weit sich eine Nichtberücksichtigung des Brechungsindex von Luft zu Wasser auswirkt, wird beispielhaft in Abbildung 1 dargestellt. Diese zeigt dieselbe Punktwolke im Aufriss (a) und frontal nebeneinander (b), einmal mit korrekt angebrachtem Brechungsindex (berechnet nach Formel 1) im Wasser und einmal mit falschen Brechungsindex für Luft statt für Wasser. Deutlich zeigt sich, dass einerseits ein Tiefenfehler von bis zu 35 cm in Z-Richtung auf Grund falsch angenommener Ausbreitungsgeschwindigkeit entsteht, und sich andererseits eine deutliche radiale Verzerrung vom Faktor 1,8 erkennen lässt.

Insgesamt bewirken Temperatur und Salinität bei gleichbleibender Wellenlänge signifikante Änderungen des Brechungsindex, MAAS (2014) quantifiziert diese mit 0,00004 je °C Temperatur und 0,002 je ‰ Salinität. Daraus wird ersichtlich, dass ein realistischer

Temperaturunterschied im Wasser einen wesentlich größeren Einflussfaktor darstellt als die Veränderung des Salzgehaltes (variiert im Meerwasser zwischen 10 und 35 ‰). Eine 20 °C Temperaturdifferenz im Wasser bedeutet somit eine theoretische Veränderung in der Distanzmessung im Submillimeterbereich auf einen Meter Messdistanz. Relevanter wird dies ab Messdistanzen von Zehn Metern, dann kann ein nicht korrekt angebrachter Brechungsindex sich im Millimeterbereich in der Tiefe auswirken.

Für Terrestrische Laserscanner über Wasser wurde der Einfluss von atmosphärischen Bedingungen bereits untersucht: HOLST et al. (2016) fassen zusammen, dass die atmosphärische Refraktion nur auf lange Scandistanzen über einige Hundert Meter eine signifikante Rolle spielt. FRIEDLI et al. (2019) stellten bei Messungen mit Kilometerdistanzen Abweichungen im Dezimeter Bereich auf Grund von meteorologischen Veränderungen fest. Die Einflüsse auf das jeweilige Medium und damit auf die resultierenden Messergebnisse sind also theoretisch ähnlich. Für Unterwasser Laserscanner gibt es bis dato jedoch noch keine veröffentlichten empirischen Untersuchungen zu den Einflüssen von Temperatur und Salzgehalt im Wasser.

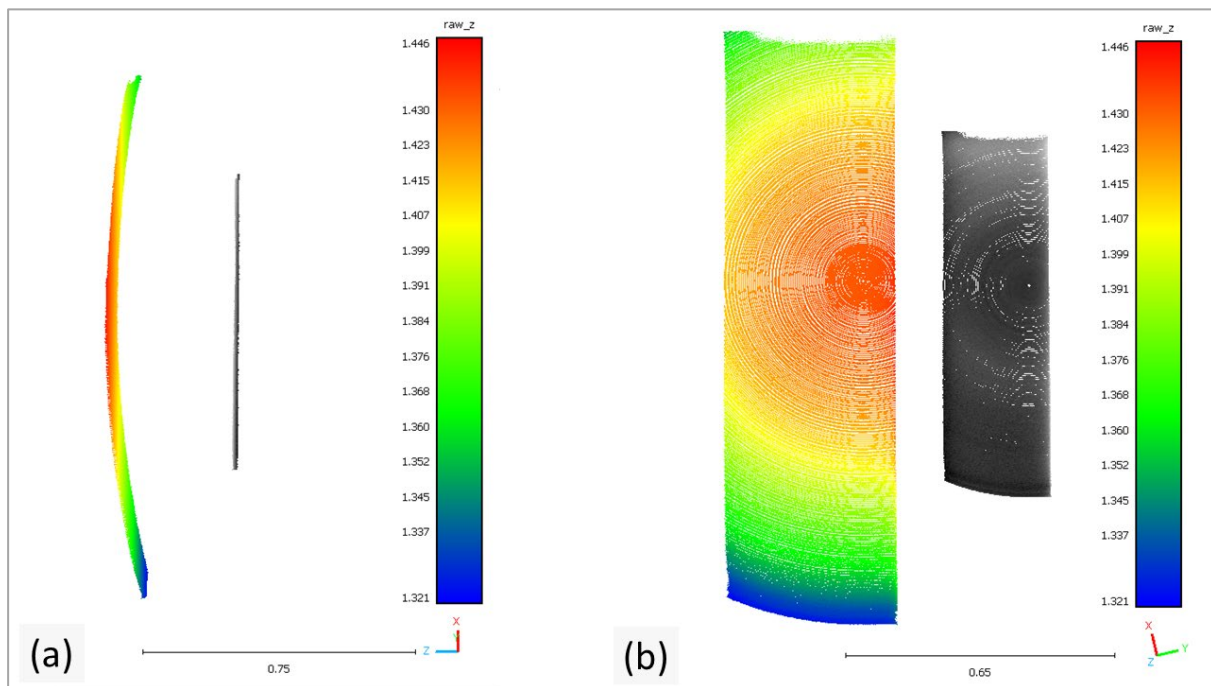


Abb. 1: Darstellung derselben unter Wasser aufgezeichneten Punktwolke auf einen Meter Messdistanz mit korrekt angebrachtem Brechungsindex im Wasser (graue Punktwolke) und mit falschem Brechungsindex von Luft statt Wasser (gefärbte Punktwolke) im Aufriss (a) zur Visualisierung des Tiefenfehlers und frontal nebeneinandergelegt (b) zur Visualisierung der radialen Verzerrung.

4 Erfassung von 3D Punktwolken einer Deformationsvorrichtung in unterschiedlichen Temperaturbereichen

Um die theoretisch beschriebenen Auswirkungen von Temperatur und Salzgehalt auf die Messeigenschaften eines Unterwasser Laserscanners zu überprüfen, werden anhand von

ermittelten Brechungsindizes unterschiedlichen Detailgrades Messungen in verschiedenen Temperaturbereichen in salzhaltigem Wasser durchgeführt.

Das Max-Planck-Institut für Meteorologie und die Forschungsgruppe Meereis des Instituts für Meereskunde der Universität Hamburg betreiben ein Eislabor mit einem Wassertank in einer Gefrierkammer. Durch Regelung der Lufttemperatur in der Gefrierkammer kann das Wasser im Tank auf unterschiedliche Temperaturen zwischen gut 20 °C und knapp unter 0 °C (abhängig von der Salinität des Wassers) gebracht werden. Der gläserne Wassertank ist 194 cm lang, 66 cm breit und zu Beginn der Experimente mit Wasser bis zu einer Höhe von etwa 93 cm gefüllt. Zwei kleine Pumpen an den unteren Seitenwänden des Tanks sorgen für eine kontinuierliche Wasserbewegung, um eine Schichtung der Wassersäule zu vermeiden. Die initiale Salinität des Wassers im Tank beträgt 21 ‰.

4.1 Verwendete Sensorik

Der Unterwasser Laserscanner ULi ist ein ToF Scanner, der mit einem grünen gepulsten Laser (Wellenlänge 532 nm) für Unterwasserabtastungen optimiert wurde. Vorangegangene Untersuchungen zeigen eine Messpräzision im Millimeterbereich und maximale Messdistanzen im Bereich der einfachen bis eineinhalbfachen Sichtweite bis maximal 19 m in klarem Wasser (HEFFNER et al. 2025). Mit einer Abtastfrequenz von bis zu 100.000 Punkten pro Sekunde und einem Sichtfeld (FoV) von 44° ermöglicht das System die Erfassung dichter Punktwolken in statischen wie dynamischen Anwendungen (FRAUNHOFER IPM 2024).

Das Laserscanmuster kann über zwei rotierende Keilprismen linear, kreisförmig oder planar zur gesamten Erfassung des FoV eingestellt werden. Der Scanner verfügt über zwei Lasermodi: Laserklasse 2M im gefilterten Modus und Laserklasse 3B im stärkeren ungefilterten Modus. Darüber hinaus kann in der starken Laserklasse noch ein Medium-Filter ausgewählt werden, der insbesondere für Messungen auf kurzen Distanzen eine Übersteuerung des Signals vorbeugt. Obwohl der Scanner für den Unterwasser Einsatz optimiert ist, kann ULi auch in der Luft messen – jedoch limitiert für kurze Zeit auf Grund der Gefahr der Überhitzung. Abbildung 2 (a) zeigt die Scaneinheit im Wassertank, Abbildung 2 (b) visualisiert den Einsatz von ULi im Geodätischen Labor der HafenCity Universität Hamburg.

Um die Temperaturen im Wassertank kontinuierlich über die Versuchsreihe zu monitoren, wurden ein T-Stick und eine Conductivity-Temperature-Depth (CTD) Sonde verwendet. Beim T-Stick handelt es sich um ein Array von 16 Temperatursensoren (Genauigkeit $\pm 0,2$ °C), welche in Zwei Zentimeter Abständen vertikal übereinander an einem Plastikstab montiert sind. Übermittelt werden die Temperaturdaten in Echtzeit über eine USB-Schnittstelle an den angeschlossenen Computer außerhalb der Gefrierkammer, gemessen wurde mit einer Frequenz von 1 Hz. Der T-Stick wurde vom Eislabor der Universität Hamburg entwickelt und für die Messungen zur Verfügung gestellt. Bei der CTD handelt es sich um eine SBE 37-SM MicroCAT, welche Leitfähigkeits- und Temperaturdaten ebenfalls in Echtzeit über eine RS-232-Schnittstelle an den Laborcomputer ausgeben kann, gemessen wurde mit einer Frequenz von 0,1 Hz. Die CTD leitet aus der Leitfähigkeit die Salinität des Wassers in ‰ ab und kann so zur Beobachtung von sowohl Salzgehalt als auch Temperatur im Wasser verwendet werden.

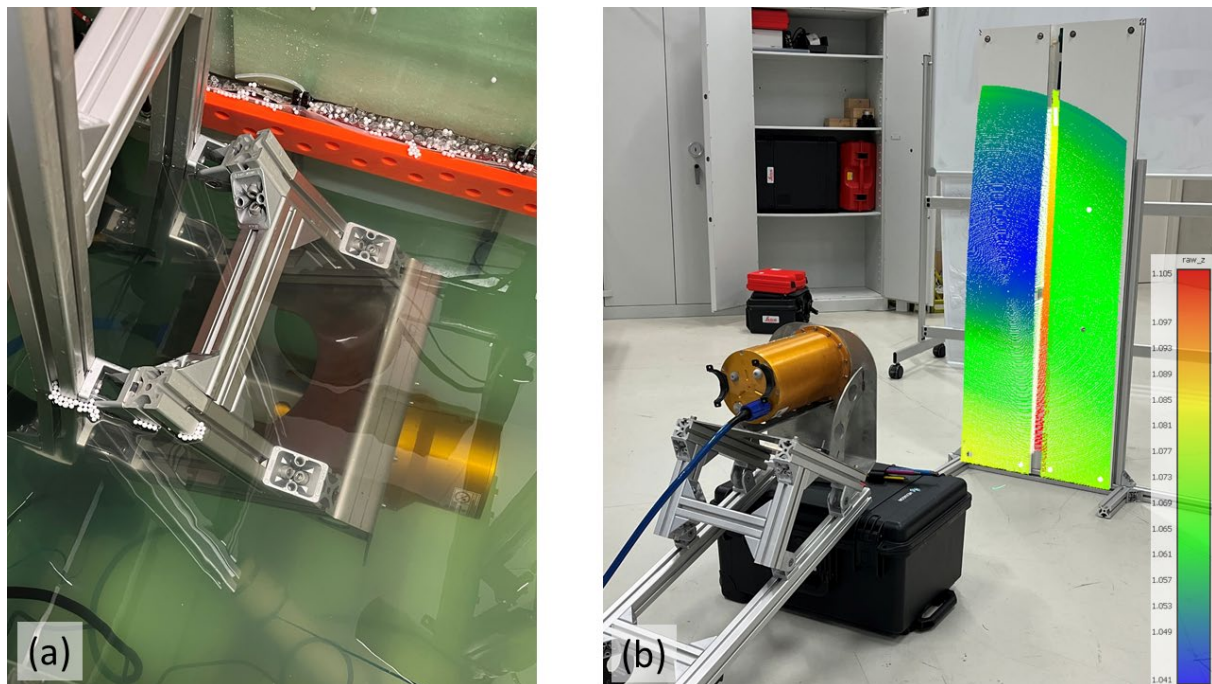


Abb. 2: Das Underwater LiDAR System ULi (a) im Wassertank des Eislabors der Universität Hamburg und (b) im Geodätischen Labor der HafenCity Universität Hamburg.

4.2 Versuchsaufbau

Zur Überprüfung der Auswirkung auf die Messeigenschaften des Unterwasser Laserscanners ULi werden Messungen in unterschiedlichen Temperaturzuständen durchgeführt. Dafür wurde ein Versuchsaufbau konzipiert, der reproduzierbar flächige Scans auf eine fixierte Vorrichtung im Wassertank mit mehreren Messepochen in Fünf Grad Schritten der Wassertemperatur ermöglicht. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 dargestellt. ULi wurde an einer Halterung aus ITEM-Profilen an der Rückseite des Glastanks in der Gefrierkammer des Eislabors montiert. In einer Entfernung von einem Meter wurde eine Messvorrichtung bestehend aus einer 8 mm starken Rückplatte und zwei 3 mm starken Vorderplatten am Tankrand mittels Schraubzwingen fixiert. Diese Messvorrichtung ermöglicht das kontrollierte Deformieren der linken Vorderplatte durch eine von der Rückplatte durchgeschraubten Schraube, wohingegen die rechte Vorderplatte als undeformierte Kontrollplatte dient. Die Deformationsplatte ist lediglich an den Ecken der 140 cm langen und 23 cm breiten Hartplastikplatte mit Schrauben und einem Abstand von 2 cm an die Rückplatte fixiert, sodass sie sich durch die Deformationsschraube auf 70 cm Höhe in der Mitte der Platte eine maximale Deformation quer zur Objektoberfläche von 12 mm ergeben kann. Im weiteren Versuchsverlauf wurde die Schraube durch eine längere Variante ersetzt, sodass noch eine zweite Deformationsstufe von maximal 24 mm erreicht werden kann. Die Wahl des Materials fiel auf weiße Kompaktplatten, um optimale Rückstreudaten des ULi zu erzielen (Walter, 2025).

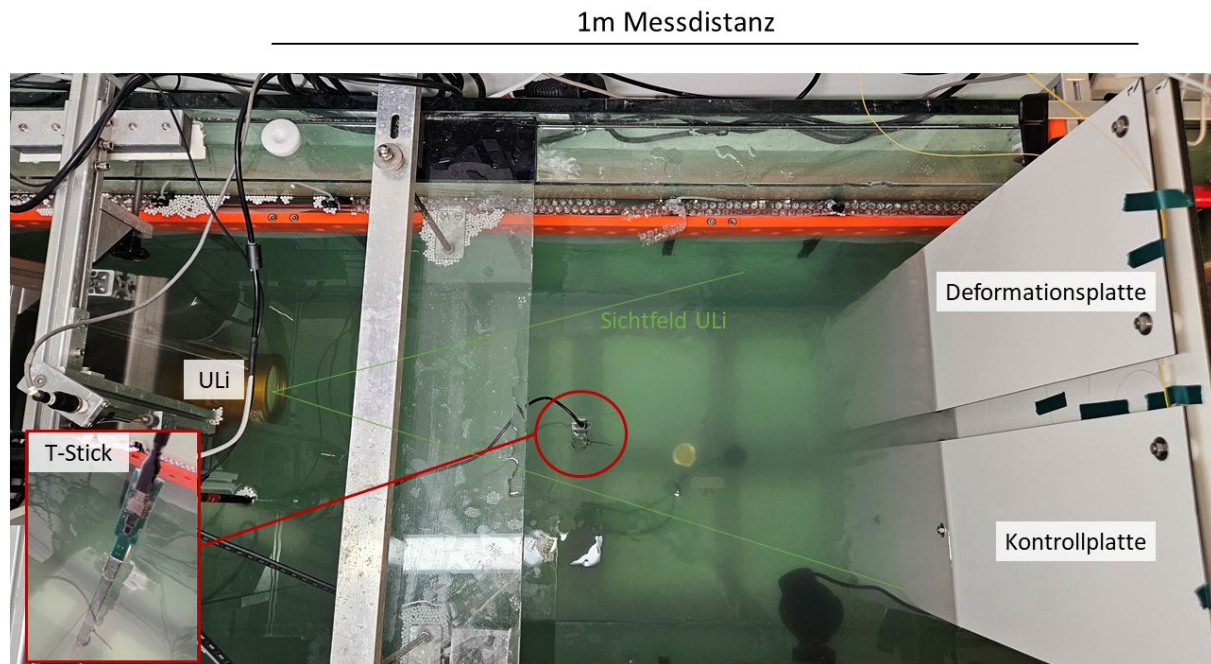


Abb. 3: Versuchsaufbau im Wassertank mit ULi, T-Stick und Messvorrichtung.

Mittig im Tank wurde der T-Stick platziert, sodass die ersten zwei Sensoren über Wasser, die anderen vertikal übereinander die Temperatur in den oberen 28 cm der Wassersäule messen. Die CTD wurde neben dem ULi in die untere Wassersäule gehängt, sodass kontinuierlich Salinität und Temperatur knapp über dem Boden des Tanks gemessen wurde.

Mit diesem Versuchsaufbau wurden insgesamt sieben Messepochen durchgeführt. Eine Messepoche besteht innerhalb eines Temperaturzustandes aus einem flächigen Scan der Messvorrichtung in Neutralstellung und einem zweiten Scan nach Deformation der Deformationsplatte. Alle hier vorgestellten Messungen erfolgten im Medium-Filter-Modus des Lasers. Es wurden folgende Messepochen während des Kühlvorgangs des Wassers hinweg aufgenommen: Ausgangsmessung (Dokumentation des Ausgangszustandes bei 19,4 °C), 20 °C Messepoche, 15 °C Messepoche, 10 °C Messepoche, 5 °C Messepoche, 0 °C Messepoche (jeweils Messungen der Neutralstellung und ersten Deformationsstufe) und eine zweite 0 °C Messepoche (Messung der Neutralstellung, ersten Deformationsstufe und zweiten Deformationsstufe).

Zudem werden nach Abschluss der Messungen im Wassertank Kontrollmessungen in der Luft im Geodätischen Labor der HafenCity Universität Hamburg durchgeführt, um einerseits die Reproduzierbarkeit der Ausgangsstellung zu kontrollieren und vor allem um mit einem Leica Absolut Scanner (LAS) AT960 Vergleichswerte für die Deformation zu ermitteln.

4.3 Auswertung der erhobenen Daten

Zuerst werden die Temperaturdaten mittels Python analysiert. Die am Laborrechner aufgezeichneten T-Stick und CTD Daten werden kontrolliert sowie Mittelwerte der Temperaturzustände zu den Zeitpunkten der Messungen berechnet. Abbildung 4 zeigt den Temperaturverlauf der Sensoren im Wasser. Deutlich zu erkennen ist, dass alle

Temperaturmessungen eng beieinander liegen und sich mit den Messungen der CTD decken. Deshalb kann von einer guten Durchmischung der Wassersäule ausgegangen werden und eine Schichtung von unterschiedlichen Temperaturbereichen im Wasser kann ausgeschlossen werden. Die Salinität des Wassers steigt leicht über den gesamten Versuchsdurchlauf um 0,15 ‰ vom Ausgangswert 21,15 ‰. Auf Basis der erhobenen Temperaturmittelwerte und der gemessenen Salinität des Wassers werden anschließend anhand Formel 1 Brechungsindizes für die jeweiligen Temperaturzustände berechnet.

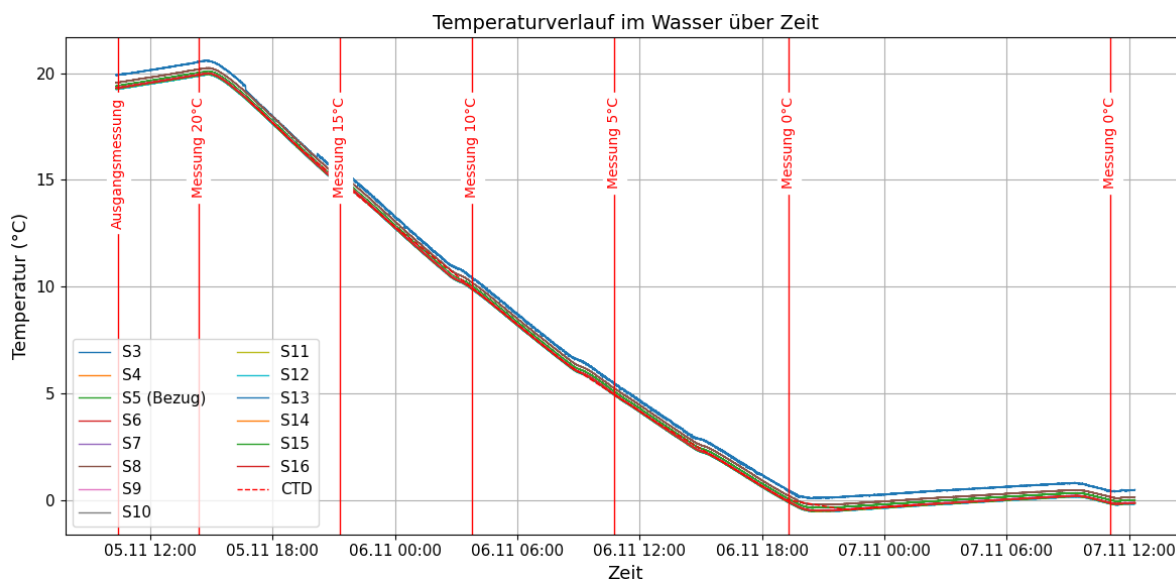


Abb. 4: Temperaturverlauf im Wasser der T-Stick Sensoren 3 bis 16 und der CTD.

Die erhobenen Scandaten werden in Pulsalyzer und CloudCompare verarbeitet. Die proprietäre Software Pulsalyzer wird verwendet, um die aufgezeichneten Rohdaten in 3D-Punktwolken umzuwandeln. In diesem Schritt werden die entsprechenden Brechungsindizes angebracht. Anschließend werden die Punktwolken exportiert und in der Open-Source-Software CloudCompare weiterverarbeitet und zu analysiert. Dort werden zuerst die einzelnen Punktwolken der Messvorrichtung segmentiert. Anschließend werden Punkte geringer Intensitäten an den Kanten der Platten und dem Abschattungsbereichen gefiltert. Das Ergebnis einer segmentierten und gefilterten Punktwolke ist in Abbildung 5 (a) zu sehen.

Für die weitere Analyse der Temperaturabhängigkeit und der Deformationen in der Versuchsvorrichtung werden zwei sechs auf sechs Zentimeter große Ausschnitte auf Höhe der maximal erwarteten Deformation auf der Deformationsplatte und äquivalent auf der Kontrollplatte ausgeschnitten (vgl. Abbildung 5 (b)). Diese Ausschnitte werden dann aus den unterschiedlichen Temperaturzuständen und Deformationsstellungen genutzt, um Abstände mittels des Cloud-to-Cloud (C2C) Verfahrens zu berechnen. Laut den Untersuchungen von HOLST (2017) ergeben sich bei Messungen mit einem Terrestrischen Laserscanner und einem ähnlichen Messaufbau mit kleinen Deformationen quer zur Objektrichtung keine Unterschiede zum Cloud-to-Mesh (C2M) Verfahren. Zur Ermittlung der Deformation innerhalb eines Temperaturzustande werden jeweils die Ausschnitte in Deformationsstellung gegen Neutralstellung verglichen. Zur Ermittlung des Verhaltens über die Temperaturbereiche hinweg, werden die Ausschnitte der einzelnen Temperaturzustände gegen die

Ausgangsmessung verglichen. Um des Streuverhalten der Punktwolken und die Messpräzision von ULi bewerten zu können werden zudem in die Ausschnitte Ausgleichsebenen eingepasst.

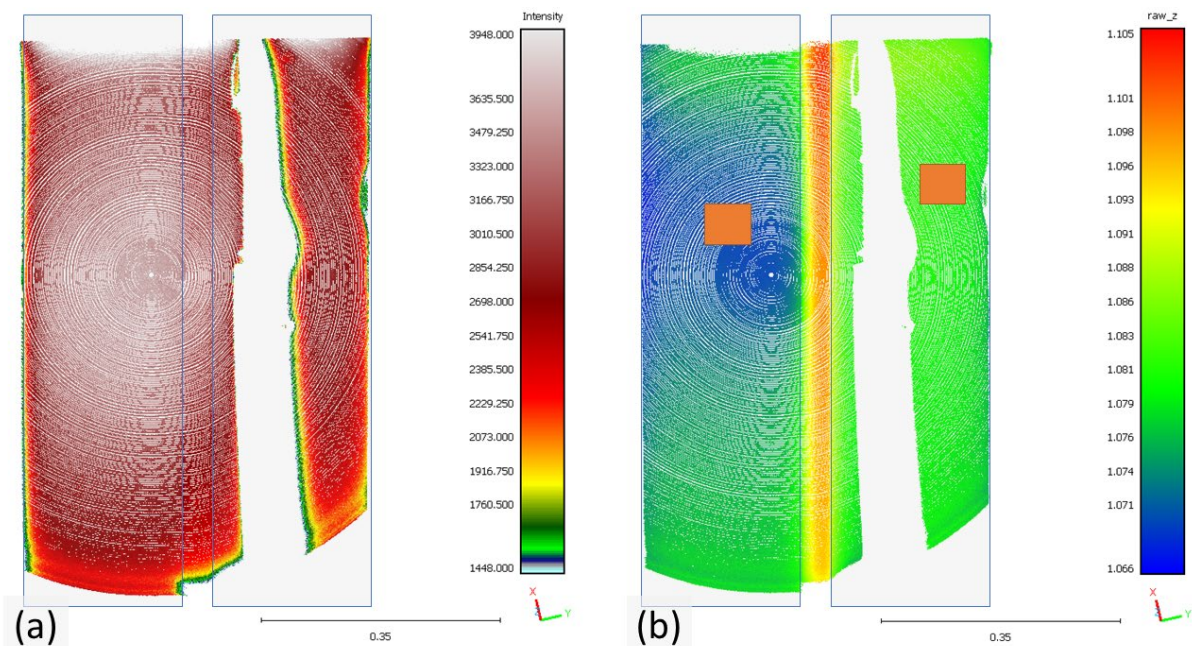


Abb. 5: 3D-Punktwolke der gescannten Deformationsvorrichtung der Ausgangsmessung nach Segmentierung und Filterung, eingefärbt (a) nach Intensität und (b) Tiefe in Z-Richtung (Scanner basiertes Koordinatensystem). Die blauen Rahmen stellen die Platten der Messeinrichtung dar. Zusätzlich sind in (b) die Lage der Vergleichspatches in orange auf der linken Deformationsplatte und der rechten Kontrollplatte visualisiert.

4.4 Ergebnisse

Die ausgewerteten Punktwolken weisen eine temperaturunabhängige gleichbleibende Qualität auf. Die Dichte der Punktwolken sind abhängig vom Abtastmuster äquivalent, es sind zudem keine Veränderungen im Rauschverhalten auf den Platten zu beobachten. Auffällig ist jedoch, dass die Messungen an der Luft deutlich besser die Kanten abbilden und unter Wasser insgesamt mehr Fehlreflexionen aus dem Medium detektiert werden. Die Messpräzision in Z-Richtung ist durch die Temperaturdifferenzen nicht beeinflusst und liegt (sowohl im Wasser als auch an der Luft) bei $\pm 0,6$ mm.

Die Deformation der linken Platte ist in allen Temperaturzuständen eindeutig detektierbar. Abbildung 6 (a) zeigt exemplarisch die Null-Grad-Messung in der zweiten Deformationsstufe. Im Aufriss in Abbildung 6 (b) sind beide Deformationsstufen vor der Neutralstellung eindeutig identifizierbar. Jedoch ist die detektierte Deformation nicht über alle Messepochen einheitlich, sie weichen sowohl vom theoretischen Soll (12 mm Erste Deformationsstufe, 24 mm zweite Deformationsstufe) als auch von den Referenzmessungen an der Luft (9,3 mm Erste Deformationsstufe, 23 mm Zweite Deformationsstufe) ab. Insbesondere die detektierten Deformationen der zweiten Deformationsstufe zeigen deutlich kürzere Distanzen (im Wasser und in der Luft). Im Mittel weichen die detektierten Deformationen der ersten Deformationsstufe um $-0,7$ mm von der Vergleichsmessung durch den LAS ab. Die

Kontrollplatte deformiert sich im Deformationszustand ebenfalls leicht in gegensätzliche Richtung, allerdings nur im Mittel 0,9 mm. Einen Überblick verschafft Abbildung 7.

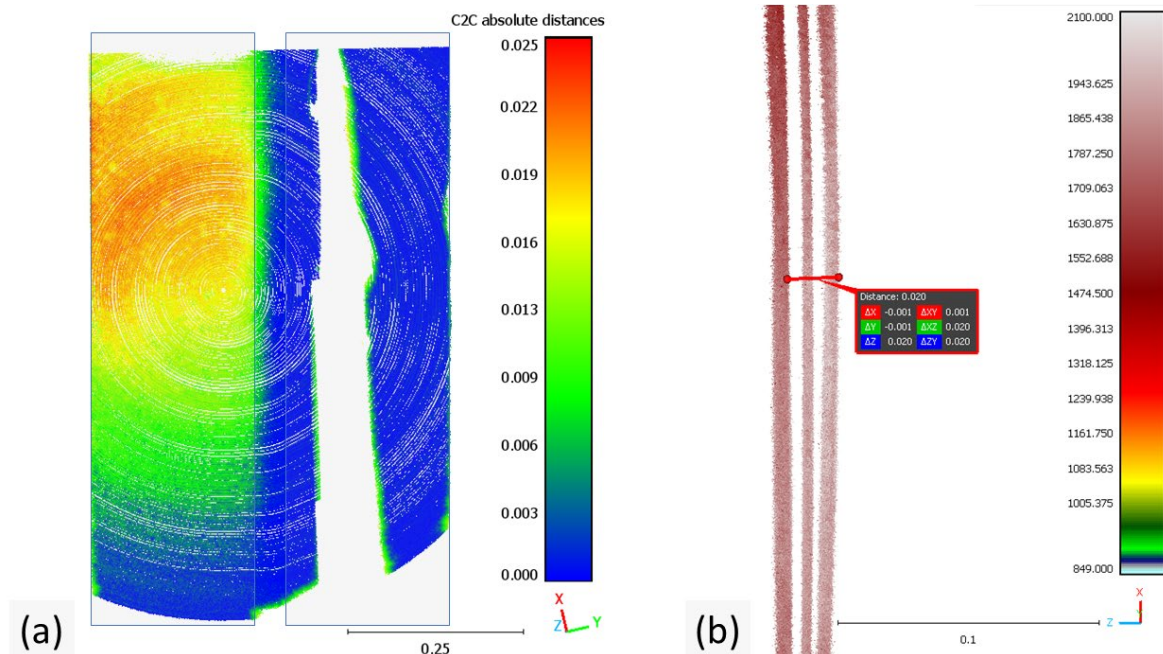


Abb. 6: 3D-Punktwolke der gescannten Deformationsvorrichtung der 0 °C Messung, (a) eingefärbt nach C2C Distanz zwischen Neutralstellung und Deformationsstellung und (b) im Aufriss eingefärbt nach Intensität mit deutlich erkennbaren Deformationen in Z-Richtung (Links: Neutralstellung, Mitte: erste Deformationsstufe, Rechts: dritte Deformationsstufe).

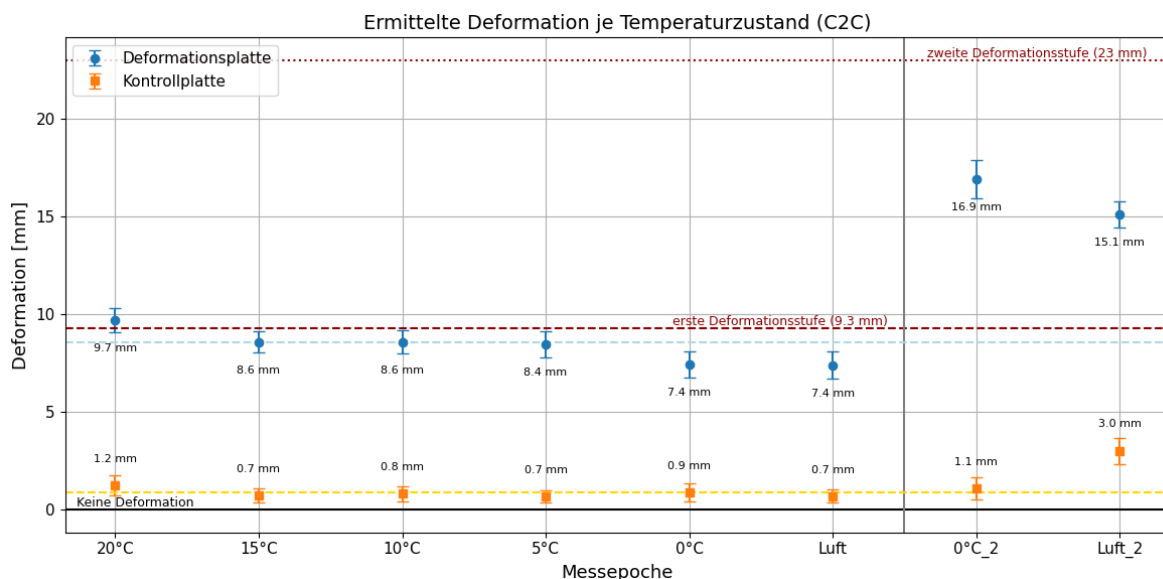


Abb. 7: Per C2C ermittelte Deformationen je Messepoche der Deformationsplatte (blau) und der Kontrollplatte (orange). Die gestrichelten Linien zeigen in dunkelrot je die Vergleichsdeformation und in der Farbe der Platten den Mittelwert der ersten Deformationsstufe. Die Fehlerbalken bilden jeweils den RMSE der ermittelten Deformationen ab.

Beim Vergleich der Scans über die verschiedenen Temperaturbereiche hinweg fallen zwei interessante Beobachtung auf: einerseits werden die ermittelten Distanzen gegenüber der Ausgangsmessung systematisch länger und zweitens spielt der Detailgrad des verwendeten Brechungsindex eine Rolle, erklärt aber nicht den zuerst beschriebenen Effekt. Es entsteht der Eindruck, als würde sich die Deformationsvorrichtung vom Scanner wegbewegen je kälter das Wasser wird. Abbildung 8 zeigt diesen linearen Effekt sowohl in der Kontrollplatte als auch in der Deformationsplatte in jeweils Neutralstellung gegenüber der Ausgangsmessung. Insgesamt werden die Messdistanzen über die Temperaturspanne von -20 °C bis zu 7 mm länger.

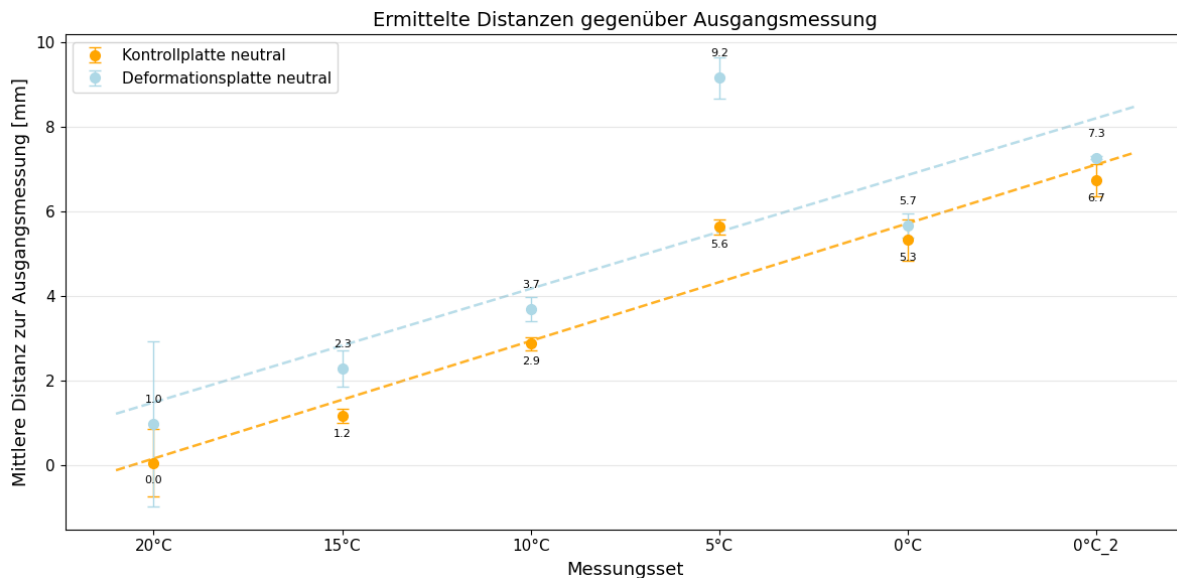


Abb. 8: Ermittelte Distanzen in Z-Richtung der Kontrollplatte (orange) und Deformationsplatte (Orange) jeweils gegenüber der Ausgangsstellung. Die Fehlerbalken bilden jeweils den RMSE der mittleren Distanzen ab.

Es werden dieselben Berechnung erneut mit einem Brechungsindex auf die vierte statt auf die zweite Nachkommastelle genau nachgerechnet, dabei fällt auf, dass dies einen Unterschied von -0,8 mm auf die bestimmten Distanzen bei -20 °C Temperaturdifferenz ausmacht. Dies bedeutet, dass ein detaillierterer Brechungsindex für beide Temperaturzustände die gemessenen Distanzen etwas verkürzt, jedoch keine mehrere Millimeter Distanzunterschied. Auf die Deformationsbestimmungen innerhalb eines Temperaturbereichs hat der Detailgrad des Brechungsindex hingegen keine Auswirkung.

5 Evaluation und Diskussion der Ergebnisse

Die ersten Genauigkeitsuntersuchungen von ULi in salzhaltigem Wasser in unterschiedlichen Temperaturbereichen zeigen deutlich, dass vergleichbare Messpräzision in den Punktwolken erzielt werden wie in den vorangegangenen Süßwasseruntersuchungen. Die Präzision in Z-Richtung ist durch die Temperaturdifferenzen nicht beeinflusst und liegt bei $\pm 0,6$ mm. Somit können die Hersteller getätigten Untersuchungen von WERNER (2023) bestätigt werden.

Die Deformationen quer zur Objektoberfläche sind eindeutig mit im Mittel unter einem Millimeter Genauigkeit detektierbar. Es fällt auf, dass je fortgeschrittener die Messungen über

den Experimentverlauf stattfinden, desto geringer werden die detektierten Deformationen. Die zweite Deformationsstufe wird von ULi weder im Wasser noch in der Luft annähernd detektiert, sondern deutlich unterschätzt.

Ein Faktor, der die abgeleiteten Deformationen beeinflusst, ist die Platzierung des Ausschnitts der Punktwolken am maximalen Deformationspunkt. Es gestaltet sich äußerst schwierig, die exakte Höhe der Deformation verursachenden Drehschraube auf der Vorderseite der Deformationsplatte zu lokalisieren, da weder Plattenfuß noch Plattenoberkante in den Unterwasserscans erfasst wurden. Der gewählte Ausschnitt wurde entsprechend der sichtbaren Verformung der Vorderplatte entlang der Z-Richtung mittig auf der Deformationsplatte platziert. Da hinterher eine kaum höhere Streuung der Ausgleichsebene im Deformationsausschnitt gegenüber der Neutralstellung oder der Kontrollplatte sowie bis auf maximal ein Grad abweichende Normalen festgestellt werden konnte, ist von einer ausreichend guten Positionierung auszugehen.

Die Beobachtung der Kontrollplatte zeigt, dass auch diese sich im Deformationszustand leicht verformt, jedoch in die gegensätzliche Richtung, im Mittel um 0,9 mm. Auch geht die Deformationsplatte nach der Verformung nicht in die exakte Neutralstellung zurück. Vergleicht man die Ebenen der Deformationsplatte mit der Kontrollplatte in Z-Richtung im jeweiligen Temperaturzustand, variieren die Plattenabstände um ± 2 mm. Dies ist jedoch in der Beurteilung der Deformationen je Temperaturzustand nicht weiter relevant, da eh pro Messepoche gegen die jeweilige Neutralstellung verglichen wird. Aus demselben Grund beeinflussen auch die beobachteten längeren Messdistanzen in kälteren Temperaturzuständen nicht die Deformationsbestimmungen, sofern die Neutralstellung, gegen welche die Deformationsstellung verglichen wird, im selben Temperaturzustand aufgezeichnet wird.

Für den beobachteten Effekt der bis zu 7 mm längeren Messdistanzen in 20 °C kälterem Wasser gibt es bisher noch keine eindeutige Erklärung. Es können jedoch folgende Einflussfaktoren als mögliche Gründe ausgeschlossen werden:

- Bewegung des Sensors (fixierte Halterung an Tankrückwand)
- Unzureichende Akklimatisierung des Sensors bzw. Effekte auf Grund von Warmlaufen der Scanvorrichtung (Sensor befand sich durchgängig im Wasser, es wurden in jedem Temperaturzustand vorab andere Messungen durchgeführt)
- Verformung der Halterung auf Grund des Temperaturunterschieds (Edelstahl Dehnungskoeffizient verursacht über 20 °C Temperaturdifferenz lediglich eine Verformung im Submillimeter Bereich)
- Verformung der Deformationsvorrichtung auf Grund des Temperaturunterschieds (das Material ist laut Hersteller temperaturbeständig, zudem wäre eine 7 mm Verformung bei einer 3 mm Platte aufgefallen)

Nicht gänzlich auszuschließen ist eine Bewegung der Deformationsvorrichtung durch das manuelle Schrauben der Deformationsschraube von der Rückplatte gegen die dünnere Vorderplatte. Die klar linear zunehmende Entfernung statt eines unregelmäßigen Verhaltens spricht jedoch dagegen. Eine Verkipfung der Deformationsvorrichtung ist nach Analyse der Punktwolken auszuschließen.

Ebenfalls gänzlich auszuschließen ist eine unzureichende Anbringung des Brechungsindizes. Tatsächlich ist die Annahme, der 20 °C Temperaturunterschied begründet direkt die 6 mm gemessener Entfernungsunterschied, verlockend, aber nicht ausreichend. Zwar passt die Richtung überein (in kälterem Wasser wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vergleich überschätzt, wodurch längere Entfernungen als in Realität abgeleitet werden), aber keine der Modelle zur Berechnung von Brechungsindizes erlaubt einen derart großen Betrag bei gleichbleibender Salinität. Wie in Kapitel 3 theoretisch erläutert und in Kapitel 4 demonstriert, verursacht eine 20 °C Temperaturdifferenz und die damit einhergehende Änderung der Brechungsindizes auf einen Meter Messdistanz lediglich einen Distanzunterschied im Submillimeterbereich. Um einen Distanzunterschied von 7 mm zu verursachen, müsste sich der Brechungsindex von 1,34 auf 1,33 reduzieren, was dem Süßwasser statt Salzwasser Brechungsindex entspräche. Da fast alle anderen Faktoren wie dargestellt ausgeschlossen werden können, liegt die Vermutung nahe, dass der temperaturbedingte Tiefenfehler mit sensorinternen Prozessen zu tun hat und bleibt somit Gegenstand für weitere Folgeuntersuchungen.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick für kombiniertes Unterwassermonitoring

Der Unterwasser Laserscanner ULi ist geeignet zur Detektion von Deformationen geringer als ein Zentimeter quer zur Objektoberfläche mit im Mittel unter einem Millimeter Genauigkeit. Damit ist er sehr gut geeignet für flächige 3D Aufzeichnung von Oberflächen unter Wasser, die einer Verformung ausgesetzt werden. Zu beachten gilt dabei jedoch, dass unterschiedliche Temperatur und Salzgehalt des Wassers einen quantifizierbaren Einfluss auf das Messergebnis haben. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass eine genaue Kenntnis der Temperatur und der Salinität des Wasser Voraussetzung für die Berechnung des Brechungsindex ist. Wenngleich der Brechungsindex von 1,34 eine gute Annahme für den Temperaturbereich von 20 °C und 21 ‰ darstellt, zeigen die Ergebnisse, dass die Verwendung des Brechungsindex bis auf die vierte Nachkommastelle einen Einfluss im Submillimeterbereich auf einen Meter Messdistanz ausmacht. Folglich sind auf zehn Meter Messdistanz bereits Auswirkungen im Millimeterbereich zu erwarten. Deshalb empfiehlt sich in jedem Fall eine exakte Berechnung und Anbringung des Brechungsindex, insbesondere wenn Messungen aus verschiedenen Temperaturbereichen miteinander verglichen werden sollen bzw. Messepochen von Objekten in unterschiedlichen Wasserbedingungen gemessen werden. Darüber hinaus müssen weitere Untersuchungen zu dem identifizierten Tiefenfehler von 7 mm in kälteren Temperaturbereichen vorgenommen werden.

Diese Schlussfolgerung zeigt aber bereits das hohe Potential eines Unterwasser Laserscanners für Unterwassermonitoring Aufgaben. Im Vergleich zu den bisherigen Messmethoden zur Überwachung von Wasserbauwerken bietet ULi eine hohe räumliche Auflösung (abhängig von Scanmuster und Messdistanz) und eine Präzision im Submillimeterbereich unter Berücksichtigung korrekter Temperatur und Salzgehaltkorrektur. Dies hebt ihn deutlich über die traditionellen akustischen 3D Messverfahren unter Wasser. Limitiert ist ULi im Vergleich zu verbauter Sensorik jedoch mit Blick auf die Kontinuität der Überwachung. Während z.B. verbaute Lichtwellenleiter eine kontinuierliche Überwachung einer Kaimauer ermöglichen

würden, erhebt ULi diskrete Messungen von Einzelzuständen mit einem jeweils deutlich erhöhten Mobilisierungsaufwand. Deshalb ist vor allem ein kombinierter Einsatz denkbar, wo mit kontinuierlichen Messmethoden (z.B. DFOS) kritische Deformationsbereiche eines Unterwasserbauwerks identifiziert werden können und anschließend mit hochauflösender 3D Sensorik wie einem Unterwasser Laserscanner die tatsächliche Deformation detektiert werden kann.

7 Danksagungen

Unser Dank gilt dem Team des Eislabors der Universität Hamburg. Wir bedanken uns, dass ihr uns für eine ganze Woche euer Labor und Teile eurer Sensorik zur Verfügung gestellt habt. Insbesondere möchten wir uns bei Niels Fuchs und Lea Nupnau bedanken für die Einführung, den immer herzlichen Austausch und die Hilfestellungen auf dem Weg zur Versuchsreihe.

Literatur

- FEINDT, F. & JESSEN, I. (2024): Anwendung und Erfahrungen mit der Nachrechnungsrichtlinie der Hamburger Hafenbehörde für Kaimauern und Uferwände. In: Der Prüfenieur, 64, S. 67-73.
- FRAUNHOFER IPM (2024): Underwater LiDAR System. Optical inspection of underwater infrastructure. <https://www.ipm.fraunhofer.de/content/dam/ipm/en/PDFs/product-information/OF/AUS/Underwater-LiDAR-ULi.pdf> (08.01.2026).
- FRIEDLI, E., PRESL, R. & WIESER, A. (2019): Influence of atmospheric refraction on terrestrial laser scanning at long range. In: Proceedings of the 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Athens, Greece, S. 15-17.
- HEFFNER, E., WALTER, A. L., SCHEIDER, A. & STERNBERG, H. (2025): Laboratory-based assessment of the Underwater Laser Scanner ULi. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48, S. 123-129.
- HOLST, C., NEUNER, H., WIESER, A., WUNDERLICH, T. & KUHLMANN, H. (2016): Calibration of terrestrial laser scanners. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 123 (6), S. 147-157.
- HOLST, C., SCHMITZ, B. & KUHLMANN, H. (2017): Investigating the applicability of standard software packages for laser scanner based deformation analyses. In: Proceedings of the FIG working week, May 29–June 2, 2017, Helsinki, Finland.
- HÖHLE, J. (1971): Zur Theorie und Praxis der Unterwasser-Photogrammetrie. In: Schriften der DGK, Reihe C, 163.
- JOST, B., HOLSTE, K. & HESSE, C. (2025): Digital twins for the sustainable maintenance of ageing waterway infrastructure, In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVIII-2/W10-2025, S. 147–153.
- MAAS, H. G. (2014). Geometrische Modelle der Mehrmedienphotogrammetrie. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 121, S. 112-116.
- NIEMEYER, F., DOLEREIT, T., NEUMANN, M., ALBIEZ, J., VAHL, M. & GEIST, M. (2019): Untersuchungen von optischen Scansystemen zur geometrischen Erfassung von Unterwasserstrukturen. In: Hydrographische Nachrichten, 113, S. 16-25.

- PARRISH, C. (2020): Index of Refraction of Seawater and Freshwater as a Function of Wavelength and Temperature. <https://research.engr.oregonstate.edu/parrish/index-refraction-seawater-and-freshwater-function-wavelength-and-temperature> (08.01.2026)
- RONDEAU, M. & PELLETIER, F. (2013): Using integrated technology to inspect quay walls. In: Port Technology International, 1-2, S. 33-34.
- SCHEIDER, A., BARNEFSKE, E. & STERNBERG, H. (2023): FOS-based Monitoring of underwater port structures. In: Proceedings of the FIG Working Week 2023, 28 May –1 June, 2023, Orlando, Florida, USA.
- SEMMELOTH, C., SCHEIDER, A. & STERNBERG, H. (2025): Faseroptische Sensorik im hafenwirtschaftlichen Monitoring: Überblick, Erfahrungen und zukünftige Anwendungsgebiete. In: WEINOLD, T. (Hrsg.): 23. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2025, S. 109-119.
- WALTER, A. L., HEFFNER, E., SCHEIDER, A. & STERNBERG, H. (2025): Underwater Laser Scanning: Integration and Testing in different environments. In: Proceedings of the FIG Working Week 2025, April 6 – April 10, 2025, Brisbane, Australia.
- WERNER, C. S., GANGELHOFF, J., FREY, S., STEIGER, D. & REITERER, A. (2023). Development of a compact pulsed time-of-flight LiDAR platform for underwater measurements. In: The International Hydrographic Review, 29(2), S. 200-207.
- ZHU, R.-H., ZHENG, J.-H., ZHANG, J.-B., WANG, H.-K., LI, T.-F. & LIU, R.-L (2020): Application of the sonar detection technique to inspection of vertical quay wall. In: MALVÁREZ, G. & NAVAS, F. (Hrsg.): Global Coastal Issues of 2020. Journal of Coastal Research, 95, S. 325-329.