Erprobung von UAV-basierter Laserbathymetrie an einem alpinen Bergsee

DAVID MADER¹, KATJA RICHTER¹, HANNES SARDEMANN¹ & HANS-GERD MAAS¹

Zusammenfassung: Die Laserbathymetrie ermöglicht eine effiziente und flächendeckende Erfassung der Gewässerbodentopographie in Flachwasserbereichen. Allerdings ist die Eindringtiefe dieser Messmethode in die Wassersäule durch das Medium Wasser und die Trübung stark begrenzt, was zu einer eingeschränkten Erfassbarkeit der Gewässerbodentopographie in tieferen Gewässern führt. Durch die Anwendung erweiterter Auswerteverfahren ist eine Steigerung der auswertbaren Gewässertiefe möglich. Bisher konnte dies jedoch trübungsbedingt nur für Gewässertiefen bis zu 3,50m gezeigt werden. In diesem Beitrag wird das Potential dieser erweiterten Auswerteverfahren an einem alpinen Bergsee mit geringer Trübung und somit hoher auswertbarer Gewässertiefe untersucht. Im Vergleich zur Standardprozessierung konnte die Eindringtiefe deutlich gesteigert werden (etwa um verdoppelt). Zusätzlich wurden Verfahren zur tiefenaufgelösten Trübungsparameterbestimmung erfolgreich getestet.

1 Einleitung

Die Laserbathymetrie ist ein Verfahren zur effizienten und großflächigen Erfassung von Gewässerbodentopographien in flachen Küstengebieten und Binnengewässern. Dabei werden Daten der Wasseroberfläche, der Wassersäule und des Gewässerbodens mit bathymetrischen Laserscannersystemen erfasst, die mit einem grünen Laserpuls (532 nm) arbeiten. Die Laserbathymetrie ist dabei nicht nur auf Flugzeuge und Helikopter als Trägerplattform beschränkt. Die Entwicklung kompakter, leichter und dennoch leistungsstarker bathymetrischer Flachwasserlaserscanner (z.B. RIEGL VQ-840-G (RIEGL 2023), YellowScan Navigator (YELLOSCAN 2024) oder Fugro RAMMS (WANG et al. 2022)) ermöglichen die Durchführung von Laserbathymetrie auch mit UAVs (Uncrewed Aerial Vehicle). Somit sind die Vorteile von UAV-Plattformen auch für bathymetrische Messaufgaben nutzbar.

Ein großer Vorteil der UAV-basierten Laserbathymetrie im Vergleich zur Airborne Laserbathymetrie (ALB) ist, dass UAVs sehr flexibel und vielseitig einsetzbar sowie in der Regel schnell verfügbar sind. Darüber hinaus sind Befliegungen von kleinräumigen Gebieten zeit- und kosteneffizient. Aufgrund der niedrigen Flughöhe und Fluggeschwindigkeit ist zu erwarten, dass die resultierende Gewässerbodenrepräsentation eine sehr hohe Punktdichte aufweist. UAVs sind außerdem kompakt und handlich und eignen sich ebenfalls für den Einsatz in gefährlichem und unwegsamem Gelände (CHOU et al. 2010). Diese Aspekte sind für die Überwachung von hydrologischer Extremereignisse und von Katastrophengebieten im Allgemeinen sehr wichtig.

In der Literatur gibt es bereits Untersuchungen zum Einsatzpotential von UAV-basierter Laserbathymetrie. MANDLBURGER et al. (2020) haben den kompakten UAV-Laserscanner VQ-840-G

295

¹ Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, D-01069 Dresden,

E-Mail: [david.mader, katja.richter1, hannes.sardemann, hans-gerd.maas]@tu-dresden.de

hinsichtlich seiner Genauigkeit und Performance untersucht. Das Ergebnis zeigt, dass der Laserscanner eine gute Genauigkeit und Tiefenmessperformance aufweist. Im Beitrag von MANDL-BURGER et al. (2022) wird anhand einer Befliegung von drei Flüssen mittlerer Größe und einer erfassten Flusslänge von ca. 107km gezeigt, dass mit UAV-basierter Laserbathymetrie bereits erfolgreich auch größere Gebiete zeiteffizient, mit hoher Punktdichte und hoher Genauigkeit erfasst werden können.

2 Problemstellung

Das Messverfahren der Laserbathymetrie hat physikalisch bedingte Grenzen in Bezug auf die Eindringtiefe in Wasser. Das Medium Wasser und die Gewässertrübung bewirken eine starke Abschwächung der Signalstärke des Signals innerhalb der Wassersäule. Dadurch können Gewässerbodenechos aufgrund einer zu geringen Signalstärke häufig nicht mehr detektiert werden. Dies kann zu einer unvollständigen Erfassung der Gewässerbodentopographie führen. Eine Möglichkeit, dieses Problem zu mindern, wäre die Erfassung des Gewässers bei Niedrigwasser. Allerdings sind viele Gewässer auch bei Niedrigwasser zu tief für konventionelle Auswertemethoden oder das Warten auf den Niedrigwasserzustand ist nicht möglich. In diesem Fall bieten erweiterte oder neuartige Auswerteverfahren von Full-Waveform-Daten eine Option, um zusätzliche Informationen zur Gewässertiefe zu ermitteln. Diese Informationen können genutzt werden, um das Messverfahren zu optimieren und die auswertbare Eindringtiefe des Messverfahrens zu erhöhen. Außerdem können Informationen zu Gewässereigenschaften wie Trübung abgeleitet werden. In bisherigen Studien (MADER et al. 2021; MADER et al. 2023a; MADER et al. 2023b) wurden die erweiterten Verfahren erfolgreich anhand von flugzeuggestützten ALB-Daten verschiedener Gewässertypen angewendet. Die maximal auswertbare Gewässertiefe lag trübungsbedingt bei ca. 3,50 m. Die Bestimmung von tiefenaufgelösten Trübungsparametern wurde bisher exemplarisch gezeigt, konnte jedoch noch nicht mit Referenzdaten validiert werden (RICHTER et al. 2022). Dieser Beitrag stellt eine UAV-basierte Laserbathymetrie Messkampagne an einem alpinen Bergsee vor. Das Ziel ist die Validierung der erweiterten Auswerteverfahren hinsichtlich der Verbesserung der auswertbaren Gewässertiefe und der Trübungsparameterbestimmung an einem Gewässer mit prinzipiell großer auswertbarer Gewässertiefe. In Kap. 3 wird eine kurze Übersicht über etablierte Full-Waveform Auswertemethoden gegeben und erweiterte Auswerteverfahren zur Detektion von Gewässerbodenpunkten sowie zur tiefenaufgelösten Trübungsmessung vorgestellt.

Kap. 4 stellt das Untersuchungsgebiet und die erhobenen Messdaten vor. In Kap. 5 werden die Ergebnisse der erweiterten Full-Waveform Auswertemethoden und der tiefenaufgelösten Trübungsparameterbestimmung präsentiert. Die Zusammenfassung des Beitrags erfolgt in Kap. 6.

3 Full-Waveform Auswerteverfahren

In diesem Abschnitt werden verschiedene Methoden der Full-Waveform Prozessierung kurz vorgestellt. Dabei soll einerseits ein kurzer Überblick über bestehende etablierte Verfahren (Kap. 3.1 und Kap. 3.2) gegeben und andererseits die Grundzüge der angewandten Methodik aufgezeigt werden (Kap. 3.3 und Kap. 3.4).

3.1 Konventionelle Peakdetektoren und Dekomposition

Es gibt verschiedene Methoden zur Auswertung und Gewinnung von Objektinformationen aus Full-Waveform Daten. WAGNER et al. (2004) und WANG et al. (2015) stellen grundlegende Methoden zur Detektion von Objektechos in Full-Waveforms vor. Diese beinhalten den Schwellwertoperator, das Peakmaximum, den Schwerpunkt und den Wendepunkt der aufsteigenden Peakflanke (Abb. 1 links). Eine komplexere Methode zur Schätzung der Peakposition, der Peakamplitude und der Parameter der Peakschärfe ist die Gaußsche Dekomposition (WAGNER et al. 2006; REITBERGER et al. 2009; MALLET & BRETAR 2009). Diese Methode ist jedoch für die Analyse von Laserbathymetriedaten aufgrund der spezifischen Signaleigenschaften durch den Einfluss der Wassersäule auf das Signal weniger geeignet. SCHWARZ et al. (2017, 2019) haben Ansätze zur Extraktion der Wasseroberfläche, der Wassersäule und des Gewässerbodens aus dem Full-Waveform Signal durch exponentielle Dekomposition vorgestellt (Abb. 1, rechts). Aus den erkannten Peaks und der bekannten Georeferenzierung der Full-Waveform Samples können Informationen bzgl. der Gewässeroberflächen- und des Gewässerbodenpunkte gewonnen werden.



Abb. 1: Links: Full-Waveform mit konventionellen Peakdetektoren. Rechts: Prinzip der exponentiellen Dekomposition nach SCHWARZ et al. (2019); σ_m = Modell des differentiellen Rückstreuquerschnitts (dBCS); τ_i = Zeitintervallgrenzen der dBCS-Segmente; E_i = Amplitudenwerte des σ_m; γ = Dämpfungskoeffizient

3.2 Standardprozessierung durch kommerzielle Softwarepakete

Die Begriffe Standardprozessierung und Online Waveform Processing (OWP) werden hier mit Echtzeitauswertung bzw. Post-Processing durch Herstellersoftware und andere kommerzielle Softwarepakete gleichgesetzt. Die genauen Verarbeitungsabläufe in diesen Softwarepaketen sind nur teilweise bekannt (PFENNIGBAUER et al. 2009; PFENNIGBAUER & ULLRICH 2010). Es ist anzunehmen, dass sowohl Peakdetektoren als auch Dekompositionsverfahren, auch in Kombination, eingesetzt werden.

3.3 Full-Waveform Stacking Methoden

Um weitere Gewässerinformationen aus den Full-Waveform Messdaten zugänglich zu machen, hat sich die Anwendung von Full-Waveform Stacking Techniken als sehr vorteilhaft erwiesen. Das Full-Waveform Stacking basiert auf einer kombinierten Analyse von eng benachbarten FullWaveform Daten, mit dem Ziel, zusätzliche Gewässertiefeninformationen zu extrahieren. Der Begriff Full-Waveform Stacking bezeichnet eine Mittelung bzw. Akkumulation von Signal(-teilen) von mehreren individuellen Full-Waveforms zu einer Pseudo-Waveform. Die Pseudo-Waveform weist ein verbessertes Signal-Rausch-Verhalten auf und ermöglicht damit eine zuverlässigere Detektion von schwachen Gewässerbodenechos.

Zwei konkrete Ansätze zur Full-Waveform Prozessierung in der Laserbathymetrie wurden bereits in vorangegangenen Arbeiten präsentiert und das Potential an ALB-Daten eines Flusses evaluiert: das signalbasierte Full-Waveform Stacking (sigFWFS; MADER et al. (2021)) und das volumetrische Full-Waveform Stacking (volFWFS; MADER et al. 2023a). Die beiden Methoden unterscheiden sich in der Erstellung der Pseudo-Waveform. Beim sigFWFS werden die kompletten Signalverläufe von an der Wasseroberfläche dicht benachbarten individuellen Full-Waveforms zu einer Pseudo-Waveform zusammengefasst (Abb. 2). Die geometrische Richtung der Laserpulse in der Wassersäule wird dabei nicht berücksichtigt. Das volFWFS hingegen berücksichtigt den geometrischen Laserpulsverlauf in der gesamten Wassersäule bis zum Gewässerboden mit Hilfe einer Voxelraumrepräsentation, aus der die Pseudo-Waveforms abgeleitet werden (Abb. 3). Bei beiden Verfahren werden basierend auf den Gewässertiefeninformationen der Pseudo-Waveforms die Gewässerbodenechos in den individuellen Full-Waveforms detektiert und extrahiert. Details zur genauen Funktionsweise der Full-Waveform Stacking Verfahren können der genannten Literatur entnommen werden.



Abb. 2: Prinzip der Pseudo-Waveform-Generierung beim sigFWFS. Pseudo-Waveform beim sigFWFS = stacked Full-Waveform. (MADER et al. 2021,2023b)



Abb. 3: Prinzip der Pseudo-Waveform-Generierung beim volFWFS. Pseudo-Waveform beim volFWFS = Ortho-Full-Waveform (MADER et al. 2023a)

3.4 Bestimmung räumlich hochaufgelöster dreidimensionaler Gewässertrübungsparameter

In RICHTER et al. (2022) wird ein Ansatz für die Bestimmung tiefenaufgelöster Trübungsparameter vorgestellt. Grundlage ist zunächst die Extraktion des Wassersäulensegments aus dem Laserpulsecho. Zu diesem Zweck wird die Volumenrückstreuung als der Signalanteil zwischen Wasseroberflächen- und Gewässerbodenecho definiert. Zur Detektion und Extraktion werden die zur Ableitung der Gewässerbodenpunkte entwickelten Full-Waveform Analyseverfahren genutzt (Kap. 3.3). Anschließend wird eine segmentweise exponentielle Funktionsapproximation (sEFA) durchgeführt. Zu diesem Zweck werden mehrere Exponentialsegmente in den Wassersäulenteil des Signals eingepasst. Das Prinzip wird schematisch in Abb. 4 dargestellt. Die sEFA liefert eine Schätzung der exponentiellen Abschwächungskoeffizienten k_i, die ein quantitatives integrales nichtmetrisches Maß für die Gewässertrübung in der durchlaufenen Wassersäule darstellen.



Abb. 4: Ermittlung tiefenaufgelöster Trübungsparameterfelder durch iterative exponentielle Funktionsapproximation

Die Anzahl der erforderlichen Segmente wird aus der Signalform selbst abgleitet. Ausgehend vom Wasseroberflächenecho wird zunächst nur der erste Teil des Wassersäulensignals in der exponentiellen Funktionsapproximation berücksichtigt. Neben dem exponentiellen Abschwächungskoeffizienten kann die Qualität der Approximation anhand des RMS-Wertes aus der Einpassung der Messwerte in das funktionale Modell beurteilt werden. Anschließend werden schrittweise weitere Samples einbezogen und die Funktionsapproximation wiederholt, bis das Ende des Wassersäulensignals erreicht ist. Dann werden die RMS-Werte aller Funktionsapproximationen untersucht. Dabei können folgende Fälle auftreten:

- 1. Die Trübung im betrachteten Abschnitt ist konstant. Die Daten werden durch das funktionale Modell gut beschrieben und der RMS ist klein.
- Der betrachtete Teil der Wassersäule enthält erste Samples einer Trübungsvariation. Die Daten werden weniger gut durch das funktionale Modell beschrieben und der RMS ist etwas größer als in Fall 1.
- Der betrachtete Teil der Wassersäule enthält viele Samples einer Trübungsvariation. Die Daten werden durch das funktionale Modell schlecht beschrieben und der RMS ist viel größer als in Fall 1.

Mit Hilfe eines empirisch ermittelten Schwellwertes wird die Stelle bestimmt, oberhalb derer der RMS-Wert ansteigt. An dieser Stelle wird ein neues Exponentialsegment hinzugefügt. Der Vorgang wird so lange wiederholt, bis alle exponentiellen Segmente gefunden wurden.



Abb. 5: Links: Lage des Untersuchungsgebietes. Rechts: UAV-basierte Laserbathymetriedaten farbkodiert mit Intensitätswerten.

4 Untersuchungsgebiet und Datensatz

Im Sommer 2022 wurde eine UAV-basierte Laserbathymetrie Messkampagne an einen alpinen Bergsee, dem Erlaufsee bei Mariazell in Österreich (Abb. 5), durchgeführt. Ziele der Messkampagne waren:

- die Erprobung der Full-Waveform Stacking Methoden aus MADER et al. (2021,2023a) f
 ür Gew
 ässer mit auswertbaren Gew
 ässertiefen >10 m;
- die Anwendung der Full-Waveform Stacking Verfahren auf UAV-basierte Laserbathymetriedaten (höhere Punktdichten, kleinere Footprints);
- die Validierung des Verfahrens zur tiefenaufgelösten Trübungsparameterbestimmung aus RICHTER et al. (2022).

4.1 UAV-basierte Laserbathymetrie Befliegung

Ein Teil des Erlaufsees wurde mit einer UAV-Befliegung erfasst. Am UAV war der bathymetrischer Laserscanner RIEGL VQ-840-G installiert, welcher mit einem grünen Laser ($\lambda = 532$ nm) und einem annähernd elliptischen Scanmuster operiert. Das Messgebiet umfasst ca. 350 m × 350 m und wurde mit sechs sich überlappenden Flugstreifen gescannt. Die Flughöhe betrug etwa 135 m über der Wasseroberfläche. Für die Messkampagne wurden zwei Befliegungen des gleichen Messgebietes mit unterschiedlicher Strahldivergenz des Laserscanners (1 mrad und 4 mrad) durchgeführt. Die Punktdichte beträgt etwa 160 Punkte pro m², wobei die Punktverteilung aufgrund des Scanmusters inhomogen ist.

4.2 Hydroakustische Messungen

Im Messgebiet wurden zur Validierung der detektierten Gewässerbodenpunkte zusätzlich hydroakustische Messungen mit einem Echolot (EchoLogger ECT400), installiert an einem Uncrewed Water Vehicle (UWV, SARDEMANN et al. 2018), durchgeführt (Abb. 6). Da es sich bei dem Echolot um ein Vertikal- oder Einstrahlecholot handelt, erfolgte die Messung der Gewässerbodentopographie streifenweise mit dem Ziel, den Boden flächenhaft zu erfassen. Die Messfrequenz des Echolots betrug 1 Hz, was je nach Fahrtgeschwindigkeit zu Punktabständen entlang eines Profils zwischen 0,5 m – 1,2 m führte. Die Abstände der Profile zueinander waren in der Regel geringer als 8 m. Die mit dem Echolot gemessenen Tiefen wurden auf Basis der Wassertemperaturen der Wassersäule, welche mit einer CTD-Sonde gemessen wurden, korrigiert. Die CTD-Messungen, die für die Temperaturkorrektur verwendet wurden, fanden allerdings nur an drei Stellen im tiefen Bereich des Sees statt. Im flacheren Gewässerteil könnten höhere Temperaturen aufgetreten sein, was einen Einfluss auf die Genauigkeit der Gewässertiefenmessung haben kann. Anschließend wurden die korrigierten Echolotmessungen mit den IMU- und RTK-Positionen des UWVs georeferenziert.

4.3 Gewässertrübungs- und Sichttiefenmessungen

Zur Erfassung von Validierungsdaten für die aus Laserbathymetrie abgeleiteten Trübungsparameter wurden an fünf Messstellen (P1 bis P5 in Abb. 6 markiert) verschiedene Wassereigenschaften mit unterschiedlichen in-situ Messmethoden bestimmt. Die Messung der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) erfolgte mittels eines sphärischen Quantensensors. Die Konzentration von Chlorophyll wurde mithilfe einer Fluoreszenzsonde bestimmt. Mit einer CTD-Sonde wurden die Werte für Temperatur, gelösten Sauerstoff, pH-Wert, Leitfähigkeit und Trübung gemessen.

Die Sichttiefe wurde mit einer weißen Secchi-Scheibe bestimmt, die an einem Maßband befestigt ist. Es wurden zwei Messungen durchgeführt. Bei der ersten Messung wurde die Tiefe gemessen, bis zu welcher die Kontur der Scheibe noch gut zu erkennen war. Mit der zweiten Messung wurde die Tiefe ermittelt, bei welcher die Scheibe nicht mehr erkennbar war. Die Sichttiefe ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel beider Tiefen.



Abb. 6: Messdaten für die Validierung der Ergebnisse der Full-Waveform Stacking Prozessierung und der tiefenaufgelösten Trübungsparameterbestimmung. Die gelben Punkte P1 - P5 zeigen die Messstellen der Trübungsmessungen. Die Messwerte der Vertikalecholotmessungen (am Südufer) sind farbkodiert nach ihrer Gewässertiefe dargestellt

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden erste Ergebnisse der Full-Waveform Stacking Auswertemethoden (Kap. 5.1) und der tiefenaufgelösten Trübungsparameterbestimmung (Kap. 5.2) vorgestellt.

5.1 Erfassung der Gewässerbodentopographie mittels Full-Waveform Stacking Auswertung

Zunächst werden die Ergebnisse von sigFWFS und volFWFS visuell analysiert. In Abb. 7 sind die extrahierten Punktwolken des Gewässerbodens in einer Draufsicht dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Flachwasserbereich (Gewässertiefe < 1,60 m) nicht korrekt extrahiert wurde (Abb. 7, lila umrandete Bereiche). In diesem Bereich konnten die Full-Waveforms aufgrund ihrer ungewöhnlichen Form (Abb. 8) nicht korrekt durch die Full-Waveform Stacking Verfahren ausgewertet werden. Solche Full-Waveforms mit sehr ähnlicher Charakteristik werden auch in SAYLAM et al. (2018) vorgestellt und mit geringen Gewässertiefen sowie einer sehr geringen Trübung erklärt. In diesen Bereichen hat die Standardprozessierung sehr gut funktioniert, sodass auf OWP-Daten zurückgegriffen werden kann. Nach dem Flachwasserbereich fällt der Gewässergrund

zunächst gleichmäßig ab und erscheint dann stark zerklüftet (rot umrandete Bereiche in Abb. 7). Die Tatsache, dass der zerklüftete Teil nicht plausibel ist, deutet darauf hin, dass die Filtermethoden zur Korrektur bzw. Eliminierung falsch erkannter Gewässertiefen nicht gut funktionieren. In MADER et al. (2021, 2023a) wird darauf hingewiesen, dass die Filtermethoden für mäßig geneigte Gewässertopographien entwickelt wurden. Da der Gewässerboden im Untersuchungsgebiet steil abfällt, wäre eine Weiterentwicklung der Filtermethoden erforderlich. Für diesen Beitrag wurden die zerklüfteten Teile des Gewässerbodens jedoch zunächst interaktiv entfernt (Abb. 9). Der plausibel erscheinende Anteil des Gewässerbodens zeigt, dass sowohl mit dem sigFWFS als auch mit dem volFWFS bis zu einer Gewässertiefe von ca. 14,5 m eine geeignete Repräsentation des Gewässerbodens mit einer hohen Punktdichte möglich ist.



Abb. 7: Draufsicht auf die schlecht gefilterten Ergebnispunktwolken der sigFWFS-Prozessierung (links) und der volFWFS-Prozessierung (rechts). Die Punkte sind farbkodiert bzgl. der Gewässertiefen dargestellt. Die nicht erfolgreich gefilterten Bereiche des Gewässerboden sind rot eingekreist. Die fehlerhaften Bereiche im Flachwasserbereich sind mit lila markiert



Abb. 8: Links: Schematische Abbildung einer bathymetrische Full-Waveform mit den drei Signalkomponenten nach GUENTHER et al. (2000). Rechts: Full-Waveform aus dem Flachwasserbereich des Erlaufsees

D. Mader, K. Richter, H. Sardemann & H.-G. Maas



Abb. 9: Draufsicht auf die gefilterten Ergebnispunktwolken der sigFWFS-Prozessierung (links) und der volFWFS-Prozessierung (rechts). Die Punkte sind farbkodiert bzgl. der Gewässertiefen dargestellt. Rote Kreise bei den Ergebnissen der sigFWFS-Prozessierung zeigen fehlerhaft detektierte Gewässertiefen

In Abb. 9 links ist gut zu erkennen, dass es auch in den plausiblen Bereichen vereinzelt Fehlstellen in den Ergebnissen der sigFWFS-Prozessierung gibt. Ein Vergleich der Punktwolken von sig-FWFS und volFWFS zeigt mit einer mittleren Höhenabweichung von -0,004 m keinen signifikanten Trend. Die Fehlstellen bzw. die lokalen Unterschiede zwischen den Punktwolken des sigFWFS und des volFWFS sind in der Differenzpunktwolke (Abb. 10) deutlich erkennbar (grüne Bereiche).



Abb. 10: Differenzpunktwolke des Vergleichs der Höhenkoordinaten zwischen sigFWFS und volFWFS Punktkwolke. Die Punktwolke ist farbkodiert bzgl. der Höhenunterschiede dargestellt. Blau = sigFWF Punktwolke liegt tiefer als volFWFS und umgekehrt

Abschließend erfolgt die Validierung der sigFWFS- und volFWFS-Punktwolken anhand der hydroakustischen Messungen. Die unbekannte Beschaffenheit und wechselhafte Geometrie des Gewässerbodens, die sowohl sehr steile als auch flachere Stellen aufweist, beeinträchtigt die Genauigkeit der Echolotmessungen (ANDERSON et al. 2007). Da die hydroakustischen Messungen generell keine übergeordnete Genauigkeit aufweisen, können sie nicht als Referenzmessungen verwendet werden. Sie eignen sich jedoch gut zur Plausibilisierung der Laserbathymetrie-Messungen. Für den Vergleich der Höhenkoordinaten wurden nur Punkte herangezogen, die sich bzgl. ihrer Lage in unmittelbarer Umgebung zu den hydroakustischen Messungen befinden (0,2 m). Die Ergebnisse der Punktwolkenvergleiche sind in Tab. 1 dargestellt. Die für den Vergleich verwendeten statistischen Werte entsprechen denen von MADER et al. (2021, 2023a, 2023b). Details zur Berechnung der statistischen Größen können unter anderem diesen Beiträgen entnommen werden.

	sigFWFS	volFWFS
Genauigkeit		
$\Delta ar{h}$	-0,13 m	-0,15 m
$\sigma_{\Delta \overline{h}}$	0,34 m	0,26 m
RMS	0,36 m	0,30 m
$\sigma_{MAD(median)}$	0,23 m	0,22 m
Inlier Rate (Litman et al., 2015)		
$ \Delta h < IHO Depth TVU Special Order (IHO, 2020)$	62,39 %	62,65 %
(25,0 cm - 27,4 cm; Wert ist tiefenabhängig)		
$ \Delta h < IHO Depth TVU Order 1a (IHO, 2020)$	87,80%	92,43 %
(50,0 cm – 53,4 cm; Wert ist tiefenabhängig)		

Tab. 1: Statistischer Vergleich der Höhenkoordinaten von hydroakustischer Messung und sigFWFS bzw. volFWFS

Betrachtet man die statistischen Werte in Abhängigkeit von der Gewässertiefe, so fällt auf, dass die Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte für die Ergebnisse des volFWFS bei geringeren Gewässertiefen schlechter sind als bei größeren Gewässertiefen. Tab. 2 verdeutlicht dies durch die beispielhafte Darstellung der statistischen Werte für die Tiefenbereiche 1 m - 7 m und 7 m - 15 m. Bei den sigFWFS Ergebnissen nimmt die Genauigkeit und Zuverlässigkeit mit zunehmender Gewässertiefe ab. In Tab. 2 sind die statistischen Werte für die gleichen Tiefenbereiche wie bei den volFWFS Ergebnissen dargestellt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die extrahierten Gewässerbodenpunkte bis zu einer Gewässertiefe von ca. 14,5 m plausibel erscheinen. Der Vergleich zwischen sigFWFS und volFWFS zeigt außerdem, dass das volFWFS insgesamt besser funktioniert hat als das sigFWFS (Tab. 1). In Tab. 2 ist zu erkennen, dass das volFWFS vor allem im Tiefenbereich von 7 m–15 m deutlich bessere Ergebnisse lieferte als das sigFWFS. Dies kann möglicherweise auf die Nichtberücksichtigung der Laserstrahlrichtung bei der Bildung der Pseudo-Wellenform im sigFWFS zurrückgeführt werden. Dadurch werden im sigFWFS Full-Waveforms zusammengefasst, die an der Wasseroberfläche nahe beieinander liegen, am Gewässerboden jedoch nicht. Dies wiederum hat zur Folge, dass bei stark geneigtem Gewässerboden in großen Gewässertiefen das ohnehin schwache Gewässerbodenecho in der Pseudo-Waveform zusätzlich "geglättet" und damit weniger zuverlässig detektierbar wird.

	sigFWFS		volFWFS		
Gewässertiefenbereich	1m-7m	7m-15m	1m-7m	7 m – 15 m	
Genauigkeit					
$\Delta ar{h}$	-0,119 m	-0,146 m	-0,180 m	-0,056 m	
$\sigma_{\Delta \overline{h}}$	0,34 m	0,32 m	0,26 m	0,21 m	
RMS	0,36 m	0,36 m	0,32 m	0,21 m	
$\sigma_{MAD(median)}$	0,21 m	0,26 m	0,22 m	0,20 m	
Inlier Rate					
$ \Delta h \leq HO Depth TVU Special Order$	65,58 %	52,79%	58,76 %	77,25 %	
(25,0 cm - 27,4 cm; Wert ist tiefenabhängig)					
$ \Delta h \leq IHO$ Depth TVU Order 1a	88,62 %	85,31 %	90,86 %	98,28 %	
(50,0 cm – 53,4 cm; Wert ist tiefenabhängig)					

Tab. 2: Statistischer Vergleich der Höhenkoordinaten von hydroakustischer Messung und sigFWFS bzw. volFWFS für unterschiedliche Gewässertiefenbereiche

Weiterhin kann festgestellt werden, dass die Eindringtiefe der sigFWFS- und volFWFS-Prozessierung deutlich höher ist als die der Standardprozessierung (OWP), die bei ca. 6,6 m - 7 m lag. Dabei ist zu beachten, dass die erreichte Gewässertiefe der OWP-Daten je nach Parameterwahl in der Standardprozessierung variieren kann.



Abb. 11: Links: Ergebnis der sEFA für eine Pseudo-Waveform. Rechts: Referenzwerte zur Gewässertrübung

5.2 Bestimmung räumlich hochaufgelöster dreidimensionaler Gewässertrübungsparameter

Abb. 11 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der sEFA zur Ableitung tiefenaufgelöster Trübungsparameter an einer Pseudo-Waveform aus dem Datensatz Erlaufsee. Es wurde eine Trübungsvariation in 2,3 m - 2,8 m Tiefe detektiert (Abb. 11 links, Segment 2), die durch die Referenzmessungen für die Gewässertrübung (Abb. 11 rechts, blaue Linie) bestätigt wird. Die Auswertung der Messungen der erfassten lokalen Gewässereigenschaften (Temperatur, gelöster Sauerstoff, pH-Wert, Leitfähigkeit, photosynthetisch aktive Strahlung und Chlorophyllkonzentration) ist zum Zeitpunkt dieser Publikation noch nicht abgeschlossen. Grundsätzlich werden mit ALB die Eigenschaften der Wassersäule im grünen Wellenlängenbereich untersucht. Die mit den entwickelten Methoden

abgeleiteten Trübungsparameter können daher nicht ohne weiteres mit den Messergebnissen anderer Messverfahren verglichen werden. Das gilt allerdings auch für konventionelle Messverfahren, die jeweils andere optische Eigenschaften der Wassersäule untersuchen und nicht miteinander kompatibel sind. Die flächendeckende und ggf. tiefenaufgelöste Bestimmung der Gewässertrübung aus ALB-Daten oder UAV-basierten Laserbathymetriedaten ist eine wertvolle Ergänzung zu konventionellen punktuellen Messverfahren und eignet sich hervorragend zur Beschreibung räumlich-zeitlicher Variationen der Trübung und der zugrundeliegenden Phänomene in einem Gewässer.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieses Beitrags war es, einerseits das Potential von Full-Waveform Stacking Auswertemethoden an einem Gewässer mit einer auswertbaren Gewässertiefe von mehr als 10 m zu untersuchen und andererseits das Verfahren der tiefenaufgelösten Trübungsparameterbestimmung anhand von Trübungsmessungen zu validieren. Beide getestete Full-Waveform Stacking Methoden ermöglichen die Erfassung des Gewässerbodens bis zu einer Tiefe von ca. 14,5 m. Dies entspricht einer Steigerung der auswertbaren Gewässertiefe um etwas mehr als 100 % im Vergleich zu den Ergebnissen der Standardprozessierung (OWP-Daten), wobei der konkrete Wert von den für das OWP verwendeten Parametern abhängig ist. In den Full-Waveform Daten der Laserscannermessungen konnte eine Trübungsvariation bei einer Gewässertiefe von etwa 2,3 m – 2,8 m festgestellt werden, die durch die Trübungsmessungen bestätigt wird. Die präsentierten Ergebnisse sind Teil erster Untersuchungen, die anhand des vorliegenden Datensatzes durchgeführt wurden. Zukünftige Arbeiten werden sich mit den folgenden Aspekten beschäftigen:

- Weiterentwicklung der Filtermethodik der Full-Waveform Stacking Prozessierung für Gewässerböden mit größerem und dynamischerem Gefälle;
- Untersuchung des Einflusses verschiedener Strahldivergenzen des Laserstrahls auf die Full-Waveform Stacking Auswertemethoden;
- weiterführende Untersuchung der Leistungsfähigkeit von sigFWFS und volFWFS durch Vergleich mit refraktionskorrigierten OWP-Daten und hydroakustischen Messungen;
- Umfassende Validierung der tiefenaufgelösten Trübungsparameter unter Einbeziehung aller in-situ Messungen.

7 Danksagung

Die Arbeiten zur Laserbathymetrie werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Die Befliegung und Datenverarbeitung mit Standardauswerteverfahren wurden von der Firma skyability GmbH durchgeführt. Wir danken dem gesamten Team der skyability GmbH für die hervorragende Zusammenarbeit, die schnelle Beantwortung unserer Rückfragen und das Interesse an unserer Forschung. Wir bedanken uns auch bei Dr. Thomas Petzoldt von der Professur für Limnologie (TU Dresden) für seine Expertise und die Durchführung der Messungen der Gewässereigenschaften. Wir möchten uns außerdem bei der Professur für Limnologie (TU Dresden) für die Bereitstellung der Messensorik bedanken.

8 Literaturverzeichnis

- ANDERSON, J. T., HOLLIDAY, D. V., KLOSER, R., REID, D., SIMARD, Y., BROWN, C. J., HAPMAN, R.C., OGGAN, R. C., KIESER, R., MICHAELS, W. L., ORLOWSKI, A., PRESTON, J., SIMMONDS, J. & STEPNOWSKI, A., 2007: Acoustic seabed classification of marine physical and biological landscapes. ICES Cooperative Research Reports (CRR), Report, https://doi.org/10.17895/ices.pub.5453.
- CHOU, T., YEH, M., CHEN, Y. & CHEN, Y., 2010: Disaster Monitoring and Management by the Unmanned Aerial Vehicle Technology. ISPRS TC VII Symposium 100 Years ISPRS. <u>https://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part7/b/pdf/137_XXXVIII-part7B.pdf,</u> letzter Zugriff 02.02.24.
- GUENTHER, G. C., CUNNINGHAM, A., LAROCQUE, P. E. & REID, D., 2000: Meeting the Accuracy Challenge in Airborne Bathymetry. Technical report. National Oceanic Atmospheric Administration/NESDIS, <u>https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA488934.pdf</u>, letzter Zugriff 02.02.24.
- IHO, 2020: Standards for Hydrographic Surveys (6th ed.), IHO Special Publication S-44, International Hydrographic Organization, Monaco.
- LITMAN, R., KORMAN, S., BRONSTEIN, A. & AVIDAN, S., 2015: Inverting RANSAC: Global model detection via inlier rate estimation. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), <u>https://doi.org/10.1109/cvpr.2015.7299161.</u>
- MADER, D., RICHTER, K., WESTFELD, P. & MAAS, H.-G., 2021: Potential of a Non-linear Full-Waveform Stacking Technique in Airborne LiDAR Bathymetry. PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, 89(2), 139-158, <u>https://doi.org/10.1007/s41064-021-00147-y</u>.
- MADER, D., RICHTER, K., WESTFELD, P. & MAAS, H.-G., 2023a: Volumetric Nonlinear Ortho Full-Waveform Stacking in Airborne LiDAR Bathymetry for Reliable Water Bottom Point Detection in Shallow Waters. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 204, 145-162, <u>https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.08.014</u>.
- MADER, D., RICHTER, K., WESTFELD, P., NISTAD, J. & MAAS, H.-G., 2023b: Analysis of the potential of full-waveform stacking techniques applied to coastal airborne LIDAR bathymetry data of the German Wadden Sea National Park. International Hydrographic Review, 29(2), 46-64, <u>https://doi.org/10.58440/ihr-29-2-a31</u>.
- MALLET, C. & BRETAR, F., 2009: Full-waveform topographic LIDAR: State-of-the-Art. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(1), 1-16, <u>https://doi.org/10.1016/j.is-prsjprs.2008.09.007</u>.
- MANDLBURGER, G., PFENNIGBAUER, M. & SCHWARZ, R., 2020: Genauigkeits- und Performanceuntersuchung eines neuen bathymetrischen UAV-Laserscanners. Publikationen der Deut. Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung u. Geoinformation e.V., **29**, 321-334.
- MANDLBURGER, G., MONETTI, D. & GREIFENEDER, C., 2022: Fließgewässervermessung mittels UAV-basierter Laserbathymetrie im Produktiveinsatz. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), **2**, 59-77.
- PFENNIGBAUER, M., RIEGER, P., STUDNICKA, N. & ULLRICH, A., 2009: Detection of concealed objects with a mobile laser scanning system. SPIE: Laser Radar Technology and Applications XIV, **7323**, 51-59.

- PFENNIGBAUER, M. & ULLRICH, A., 2010: Improving quality of laser scanning data acquisition through calibrated amplitude and pulse deviation measurement. SPIE: Laser Radar Technology and Applications XV, 7684, 463-472.
- REITBERGER, J., SCHNÖRR, C., KRZYSTEK, P. & STILLA, U., 2009: 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(6), 561-574, <u>https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.04.002</u>.
- RICHTER, K., MADER, D., WESTFELD, P. & MAAS, H.-G., 2022: Determination of 3D Water turbidity parameter fields from LiDAR bathymetry data by volumetric data analysis. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf., XLIII-B2-2022, 945-951, <u>https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-945-2022</u>.
- RIEGL, 2023: RIEGL VQ-840-G. Datenblatt. <u>http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldown-loads/RIEGL_VQ-840-G_Datasheet_2023-09-11.pdf</u>, letzter Zugriff 19.01.24.
- SARDEMANN, H., ELTNER, A. & MAAS, H., 2018: Acquisition of geometrical data of small rivers with an unmanned water vehicle. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2, 1023-1027, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-2-1023-2018.
- SAYLAM, K., HUPP, J. R., ANDREWS, J. R., AVERETT, A. R. & KNUDBY, A., 2018: Quantifying Airborne Lidar Bathymetry Quality-Control Measures: A case study in Frio River, Texas. Sensors, 18(12), 4153, <u>https://doi.org/10.3390/s18124153.</u>
- SCHWARZ, R., PFEIFER, N., PFENNIGBAUER, M. & ULLRICH, A., 2017: Exponential decomposition with implicit deconvolution of LiDAR backscatter from the water column. PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, 85(3), 159-167, <u>https://doi.org/10.1007/s41064-017-0018-z.</u>
- SCHWARZ, R., MANDLBURGER, G., PFENNIGBAUER, M. & PFEIFER, N., 2019: Design and evaluation of a full-wave surface and bottom-detection algorithm for LIDAR bathymetry of very shallow waters. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 150, 1-10, https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.02.002.
- WAGNER, W., MELZER, T., BRIESE, C. & KRAUS, K., 2004: From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: Potential and practical challenges. International Archives of Photo-grammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **35**, 201-206.
- WAGNER, W., ULLRICH, A., DUCIC, V., MELZER, T. & STUDNICKA, N., 2006: Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60(2), 100-112, <u>https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2005.12.001.</u>
- WANG, C., LI, Q., LIU, Y., WU, G., LIU, P. & DING, X., 2015: A comparison of waveform processing algorithms for single-wavelength LiDAR bathymetry. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 101, 22-35, <u>https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.11.005.</u>
- WANG, D., XING, S., HE, Y., YU, J., XU, Q. & LI, P., 2022: Evaluation of a new lightweight UAV-Borne Topo-Bathymetric LIDAR for shallow water bathymetry and object detection. Sensors, 22(4), 1379, <u>https://doi.org/10.3390/s22041379.</u>
- YELLOWSCAN, 2024: YellowScan Navigator. Datenblatt. <u>https://www.yellowscan.com/pro-ducts/navigator-bathymetric-lidar/</u>, letzter Zugriff 19.01.24.