

# Detallierte Analyse komplexer Wellenformen eines UAV Laser Bathymetrie Profilmessgerätes

ROLAND SCHWARZ<sup>1</sup> & MARTIN PFENNIGBAUER<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Lineare Erfassung von Profilen in der Hydrologie und im Wasserbau hat trotz der Verfügbarkeit von mehrdimensionaler Modellierung nach wie vor seine Berechtigung. Der von RIEGL entwickelte Bathycopier, ein unbemannter Oktokopter ausgestattet mit dem Bathymetric Depth Finder RIEGL BDF-1, ist ein für die Profilerfassung speziell für die kleinräumige, unbemannt-luftgestützte Anwendung geeignetes UAV. Das primär erwartbare Ergebnis aus einer Befliegung mit diesem Vermessungs-UAV ist ein topografisches Profil eines Wasserkörpers bestehend aus den Linien des Bodens und der Wasseroberfläche. Bei der verwendeten Aufnahmetechnik werden dabei zunächst die kompletten Kurvenformen der rückgestreuten Laserechos aufgezeichnet, um in einer Nachverarbeitung die Punkte der Oberfläche und des Bodens zu extrahieren. Die aufgezeichneten Wellenformen zeigen dabei hohes Detailreichtum, der derzeit ungenutzt und noch nicht zur Gänze verstanden ist. Während das Studium des Verlaufs der Rückstreuung in der Atmosphäre zum Standardrepertoire in der Laser-Messtechnik zählt, ist die Beschäftigung mit den Ausbreitungsdetails in der Wassersäule noch nicht vollständig im technischen Alltag angekommen. Eine Unterscheidung von Artefakten, die durch das Verfahren selbst verursacht sind, und Strukturen, die für das Verständnis der Wassersäule nützlich sind, könnte ein erster Schritt zu einer Nutzbarmachung dieser durch das Verfahren ohnehin anfallenden und derzeit brachliegenden Daten sein.*

## 1 Einleitung

Die genaue Kenntnis der Morphologie von Gewässern ist für eine Vielzahl von Anwendungen von erheblicher Bedeutung. Für die Schifffahrt, Fischerei, Bauprojekte, Umweltschutz, Abschätzung von Risiken durch Fluten und Stürme oder die Erfassung der entstandenen Schäden ist es unerlässlich, wiederholt hochauflösende und präzise Vermessungen von Ufer, Wasserspiegel, Gewässergrund und der umliegenden Landschaft durchzuführen. Bei schiffbaren Gewässern kann die Erfassung des Gewässergrunds mittels Echolot erfolgen. Die gewonnenen Daten können dann mit jenen von Landvermessung kombiniert werden, wobei der unmittelbare Uferbereich meist gar nicht oder nur unzulänglich erfasst werden kann. Dieses Problem wird durch Airborne Laserscanning gelöst, wo von der Luft aus eine nahezu lückenlose Erfassung von Gewässern und deren Umland erfolgen kann. Für kleine, seichte Gewässer oder kleinflächige Vermessungsprojekte kommt nach wie vor die traditionelle Methode der Vermessung mittels Messlanze, die direkt mit einem GPS Empfänger ausgestattet ist oder deren Position vom Land aus mittels Totalstation vermessen wird, zum Einsatz. Speziell bei Fließgewässern werden auf diese Art und Weise Profile in vorgegebenen, regelmäßigen Abständen erfasst.

---

<sup>1</sup> Riegl Research Forschungsgesellschaft mbH, A-3580 Horn,  
E-Mail: [rschwarz, mpfennigbauer]@riegl.com

Inspiziert durch diese klassische Methode der Vermessung von Fließgewässern und unter Berücksichtigung der Einschränkungen hinsichtlich Gewicht, Leistungsaufnahme und Größe entwickelte RIEGL einen Laser-Entfernungsmesser zur Erfassung von Gewässerprofilen von unbemannten fliegenden Plattformen (UAVs) aus. Der mit einem bei 532 nm, also im sichtbaren grünen Wellenlängenbereich, emittierenden Laser ausgestattete Entfernungsmesser wird dabei von dem UAV über das Gewässer bewegt und erfasst dabei Ufer, Wasseroberfläche und Grund, soweit es die Wasserqualität und -tiefe zulassen. Durch Verzicht auf einen Scanmechanismus muss zwar auf die flächige Erfassung des Geländes verzichtet werden, dafür kann aber Größe und Gewicht des Messinstruments klein genug gehalten werden, um auch von small UAVs der Gewichtsklasse < 25 kg getragen werden zu können. Die geringe Flughöhe beim Einsatz von UAVs von < 50 m ermöglicht die Aufzeichnung der gesamten Echowellenform zur späteren Nachbearbeitung mit geeigneter Software. Darüber hinaus ergibt sich der Vorteil, dass aufgrund der geringen Fortbewegungsgeschwindigkeit von typisch wenigen m/s die Echosignale aufeinanderfolgender Laserschüsse zu einer Messung kombiniert werden können. Daraus ergeben sich Echo-Wellenformen mit gegenüber der Einzelmessung verbessertem Signal-Rauschverhältnis. Die detaillierte Analyse dieser Wellenformen ergibt nicht nur Lage von Oberfläche und ggf. Grund sondern kann auch Informationen über die Wassersäule, wie Absorptionskoeffizient aber auch etwaige Schichtungen liefern. Dies ist Gegenstand dieses Beitrags. Wir verwenden dazu einen Datensatz der auf Hawaii im Hafen von Hilo rund um einen Wellenbrecher aufgenommen wurde.

## **2 LIDAR Wellenformen in der Bathymetrie**

### **2.1 Full-Waveform LIDAR**

Seit mehr als einem Jahrzehnt sind so genannte „Full-Waveform“ LIDAR (Light Detection and Ranging) Systeme im kommerziellen Einsatz (MALLETT & BRETAR 2008) die in der Lage sind, den kompletten vom Ziel zurückgestreuten Wellenzug eines ausgesendeten Laserimpulses im zeitlichen Verlauf zu digitalisieren und teilweise oder vollständig aufzuzeichnen. In der Nachverarbeitung können die so erfassten Daten mit Hilfe von Algorithmen unterschiedlichen Komplexitätsgrades und Rechenzeitaufwandes analysiert werden. Ein Standardverfahren ist die Zerlegung in Gauss-Glockenkurven (WAGNER et. al 2006), bei dem Positionen von Einzelzielen sowie deren Amplituden ermittelt werden.

Die Gestalt der empfangenen Wellenform hängt sowohl von der Zielsituation (Einzelziel, Mehrfachziel) als auch von der Form des ausgesandten Lasersignals und der Filtercharakteristik des Empfängers ab.

### **2.2 Superpositionsprinzip**

Bei inkohärenter Detektion des empfangenen Laserimpulses sowie bei Betrieb des Detektors und seiner Empfangselektronik im linearen Bereich kann die Gültigkeit des Superpositionsprinzips angenommen werden. Dieses Prinzip besagt, dass sich das Gesamtsignal aus den an einzelnen Zielen zurückgestreuten Teilwellen durch Summation zusammensetzt. Das Empfangssignal

$$p_r(t) = B \sum_i \beta_i p_s \left( t - 2 \frac{n}{c_0} z_i \right) \quad (1)$$

einer Anzahl diskreter Ziele an den Entfernungen  $z_i$  vom Sensor mit den Rückstreukoeffizienten  $\beta_i$  und einer Skalierungskonstanten  $B$  wird aus um die doppelten Laufzeiten  $\frac{n}{c_0} z_i$  verschobenen Versionen des effektiven Sendepulses  $p_s(t)$  gebildet. Die Konstante  $B$  fasst die Eigenschaften des Sensors, wie Sende- und Empfangsapertur, Verstärkungsfaktor des Empfängers und die Grunddämpfung zufolge der Distanz zwischen Sensor und Ziel zusammen. Für  $n$  ist der Wert des im jeweiligen Medium gültige Wert des Brechungsindex zu einzusetzen,  $c_0$  ist die Lichtgeschwindigkeit. Gleichung (1) gilt mit guter Näherung für Ziele deren Ausdehnung klein gegen die Entfernung zum Sensor ist. Der effektive Sendepuls setzt sich dabei aus der Form des ausgehenden Laserpulses und der Impulsantwort des Empfangsfilters zusammen und wird im Folgenden als Systemwellenform bezeichnet (WAGNER et al. 2006).

### 2.3 Verteilte Rückstreuung aus der Wassersäule

Der Laserpuls erfährt bei der Ausbreitung im Wasser eine Dämpfung und wird an Inhomogenitäten und Partikeln gestreut. Die in Richtung zum Sensor zurückgestreute Lichtmenge steht im Zusammenhang mit den inhärenten optischen Eigenschaften von Wasser, dem Absorptionskoeffizient  $a$  und dem Streukoeffizient  $b$ , als auch den Strahleigenschaften und dem Sichtfeld der Empfangsoptik. Ein vereinfachtes Modell, streng nur gültig für ein infinitesimal kleines Sichtfeld und homogene unendliche ausgedehnte Wassersäule (GORDON 1982) lautet

$$p_r(t) = B \int_{z_0}^{\infty} p_s \left( t - 2 \frac{n(z)}{c_0} z \right) \beta e^{-2k(z-z_0)} dz \quad (2)$$

wobei  $z_0$  die Entfernung bis zur Wasseroberfläche ist,  $\beta$  der Rückstreukoeffizient und  $k = a + b$ , der Dämpfungskoeffizient, der die Summe aus Absorptions- und Streukoeffizient ist. Der exponentielle Zusammenhang nach Gleichung (2) ist die so genannte „Single Scattering“ Lösung, die auch im „Multiple Scattering“ Fall Bedeutung hat, obwohl dann der Dämpfungskoeffizient durch einen effektiven Dämpfungskoeffizienten ersetzt werden muss. Unter Beachtung, dass  $n(z)$  für  $z > z_0$  durch den als konstant angenommenen Brechungsindex  $n_w$  von Wasser ersetzt werden kann, kann man die Gleichung 2 durch Variablensubstitution umschreiben zu

$$p_r(t) = B \int_{\tau_0}^{\infty} p_s(t - \tau) \frac{c_0}{2n_w} \beta e^{-k \frac{c_0}{n_w} (\tau - \tau_0)} d\tau. \quad (3)$$

Das Modell setzt sich demnach aus der vom Sensor abhängigen System Wellenform  $p_s(t)$  und aus dem Exponentialmodell für die Wassersäule über eine Faltungsbeziehung zusammen. Die Systemwellenform, ein gerätespezifischer Parameter, gewinnt man indem man mit dem Sensor auf eine planare, im rechten Winkel zur Laserstrahlachse angeordnete, Fläche mit einer Ausdehnung größer als der Laserfootprint misst und die dabei gewonnene Wellenform aufzeichnet.

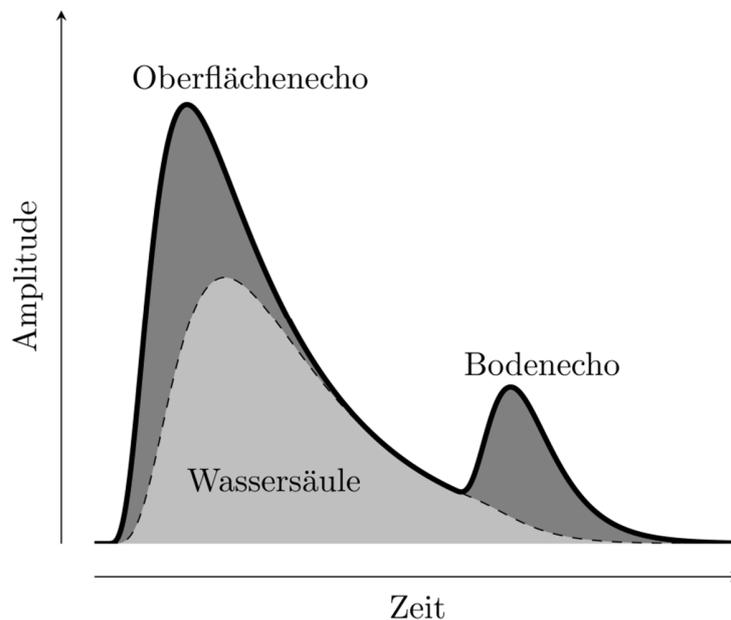


Abb. 1: Prototypische Bathymetrie Wellenform bestehend aus zwei Interface Echos, Oberfläche und Boden, sowie dem Echo der Wassersäule.

## 2.4 Oberfläche – Wassersäule – Boden

Wasseroberfläche und Boden sind im Unterschied zur Wassersäule diskrete Ziele und deshalb in erster Annäherung als Dirac Funktionen modellierbar.

Mit

$$\sigma(z) = \beta_s \delta(z - z_0) + (u(z - z_0) - u(z - z_1)) \beta_v e^{-k(z-z_0)} + \beta_b \delta(z - z_1) \quad (4)$$

erhält man für die prototypische Bathymetrie-Wellenform den Ausdruck

$$p_r(t) = \int_{z_0}^{\infty} p_s \left( t - 2 \frac{n_w}{c_0} z \right) \sigma(z) dz \quad (5)$$

wobei  $u(z)$  die Heaviside'sche Sprungfunktion ist,  $z_0$  die Distanz bis zur Wasseroberfläche,  $z_1$  die Distanz bis zum Boden ist und  $\beta_s, \beta_v, \beta_b$  die zugehörigen Rückstreuoeffizienten sind.

Abb. 1 zeigt eine prototypische Bathymetrie-Wellenform nach Gleichung (4) und Gleichung (5).

## 2.5 Feinstruktur

Sowohl Absorptionskoeffizient als auch Streukoeffizient unterliegen räumlichen Schwankungen. Das Modell nach Abschnitt 2.4 muss deshalb gegebenenfalls um zusätzliche Komponenten erweitert werden.

### 3 Datensätze – Hafen von Hilo

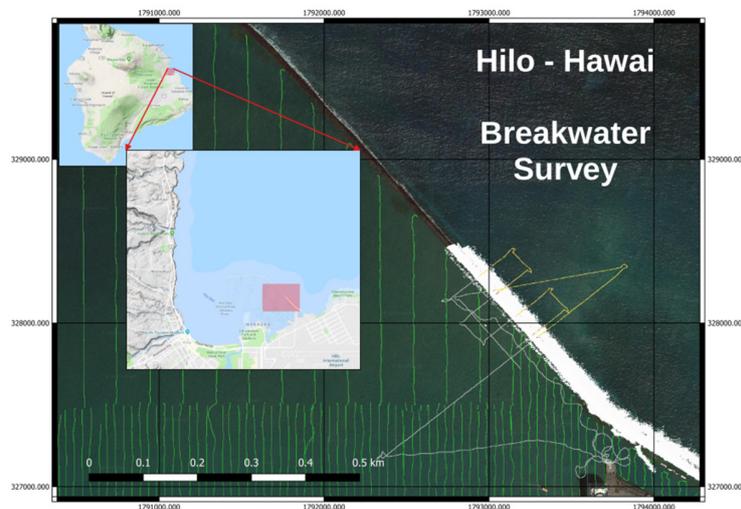


Abb. 2: Übersicht: Wellenbrecher und Messprofile. Weißes Band: VUX-SYS; graue und gelbe Linie: BDF-1; grüne Linien: Echolot; Hintergrund Bild und Karten: Imagery @2018 Google, Map data @2018 Google.

Für die Untersuchungen stand ein Datensatz zur Verfügung, der im Rahmen einer Evaluierung der Anwendbarkeit von Unmanned Laser Scanning (ULS) für die regelmäßige Prüfung der strukturellen Integrität von Hafenuauern im Juni 2018 aufgenommen wurde (LEWINTER et al. 2018). Neben der Erfassung der Hafenuauer in 3D wurden auch zwei Befliegungen mit einem bathymetrischen Laser-Entfernungsmesser durchgeführt. Details über die Vorverarbeitung der Trajektorie und die Datenerfassung können bei LEWINTER et al. (2018) nachgelesen werden.

#### 3.1 3D – Punktwolke

Insgesamt wurden drei Befliegungen mit dem topographischen Scanner RIEGL VUX-1LR durchgeführt. Für diesen Bericht dienen diese Datensätze allerdings nur zu Illustrationszwecken. In Abb. 2 ist der Flug mit der Nummer 1 als weißes Band im rechten unteren Bildteil zu erkennen. Die Flughöhe betrug 30 m bei einer Dauer von 30 Minuten. Die Daten standen als RiPROCESS (eine Software der Firma RIEGL) Projekt zur Verfügung.

#### 3.2 2D – Profilpunkte

Mit dem BDF-1 von RIEGL wurden zwei Flüge durchgeführt, beide in einer Flughöhe von 20 m und einer Dauer von ca. 20 Minuten. Der BDF-1 ist ein speziell für die Bathymetrie entwickelter Sensor mit einem Laser der Wellenlänge 532 nm, um unter die Wasseroberfläche eindringen zu können. Die nominale Messrate des BDF-1 beträgt 4 kHz und die Fluggeschwindigkeit lag bei  $2 \text{ ms}^{-1}$ . Daraus ergibt sich ein Punktabstand von 0.5 mm und nach einer Mittelung von je hundert Messungen ein Punktabstand von 5 cm. Vermessen wurden Wasserkörper auf der Hafenseite und im offenen Meer, die Ergebnisse wurden entsprechend auf zwei Datensätze aufgeteilt. In Abb. 2 sind die Flüge über dem Hafenbecken in Grau und die Flüge über dem offenen Meer in Gelb zu erkennen.

### 3.3 Echolot Messungen

Als Referenz standen Messungen mit dem Echolot vom April 2016 zur Verfügung, die nach Baggerarbeiten im Hafenbecken durchgeführt worden waren (PORTLAND 2016). Die Lotungen lagen in einer maschinenlesbaren Form vor. Die vertikale Komponente wurde durch Vorzeichenumkehr in eine Höhenkoordinate umgewandelt und um einen Offset von 69,511 Surveying Foot verschoben (Siehe Abschnitt 5.1).

## 4 Methodik

### 4.1 Vorverarbeitung

Um die Performance von Bathymetrie-Sensoren zu steigern, ist eine hohe Empfindlichkeit wünschenswert. Eine hohe Empfindlichkeit erfordert ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR), das durch Mittelung vor der Analyse erhöht werden kann. Das SNR nimmt bei der Mittelung von  $M$  aufeinander folgenden Messungen gemäß  $SNR_{avg} = SNR\sqrt{M}$  zu. Die hohe Empfindlichkeit des Sensors geht auch mit einer erhöhten Anzahl von Schein-Echos einher, die durch spontane Stromimpulse im Photodetektor ausgelöst werden. Um eine Verfälschung der gemittelten Wellenformen durch die Ausreißer zu verhindern, werden diese vor der Mittelung entfernt, indem nur das 95 Perzentil der Abtastwerte jedes Abtastzeitpunktes verwendet wird.

### 4.2 Zerlegung und Klassifikation der Wellenform

Die Basis für ein Modell, das zusätzliche Freiheitsgrade zur Verfügung stellt mit denen es an Wellenformen angepasst werden kann, die durch Unterwasserstrukturen verursacht werden, wurde von SCHWARZ et. al (2017) vorgestellt. Dieses Modell, das ausschließlich aus Exponentialtermen besteht, wird um zwei Elemente erweitert und besteht damit aus den folgenden drei Elementen:

$$\begin{aligned}\sigma_E(z) &= (u(z - z_0) - u(z - z_0 - T))\beta_E e^{-K(z-z_0)} \\ \sigma_B(z) &= (u(z - z_0) - u(z - z_0 - T))\beta_B \\ \sigma_D(z) &= \delta(z - z_0)\beta_D\end{aligned}\quad (6)$$

$\sigma_E$  für Exponentialsegmente,  $\sigma_B$  für Rechtecksegmente und  $\sigma_D$  für impulsförmige Dirac Segmente. Das Modell für die empfangene Wellenform lautet damit

$$p_r(t, \varphi) = \int_0^\infty p_s\left(t - 2\frac{n_w}{c_0}\right) \sum_i \sigma_{Mi}(z) dz. \quad (7)$$

Der Index  $M$  kann dabei die Werte  $E, B, D$  für die verschiedenen Teilmodelle annehmen und  $\varphi$  steht für ein Tupel dessen Elemente die Parameter aller Teilkomponenten sind.

Die Abtastwerte der empfangenen Wellenform an den diskreten Zeitpunkten  $t_n$  werden mit  $y(t_n) = y_n$  bezeichnet. Die Zerlegung der Wellenform wird nun schrittweise durchgeführt, wobei in jedem Schritt das Modell um eine weitere Komponente ergänzt wird. Angenommen das Modell des  $m$ -ten Teilschrittes lautet  $p_{r,m}(t, \varphi_m)$  dann wird zunächst eine um diesen reduzierte Wellenform

$$y_{m+1}(t_n) = y_m(t_n) - p_{r,m}(t_n, \varphi_m) \quad (8)$$

ermittelt, anhand der ein einzelnes Elementmodell nach Gleichung (6) ausgewählt und benutzt wird, um Parameterwerte zu schätzen. Diese Parameter werden dem Tupel  $\varphi_m$  angehängt, so dass daraus das neue Tupel  $\varphi_{m+1}$  entsteht. Mittels einer nichtlinearen „Least Squares“-Methode, wie zum Beispiel Levenberg-Marquardt, wird nun das gesamte neue Parameter Tupel angepasst

$$\varphi_{m+1,opt} = \operatorname{argmin}_{\varphi_{m+1}} \sum_n [y(t_n) - p_{r,m+1}(t_n, \varphi_{m+1})]^2. \quad (9)$$

Die Iteration wird abgebrochen, wenn die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Restfehler mit den Messfehlern in einer vergleichbaren Größenordnung steht oder wenn keine Verbesserung zwischen den Schritten erreicht wird. Im Unterschied zu SCHWARZ et. al (2017) erlauben wir in dem hier verwendeten Modell überlappende Positionierungen der Teilmodelle.

Die Parameter des resultierenden Tupels werden für die Erzeugung einer Punktwolke herangezogen. Die Parameter, die den  $z_0$  entsprechen werden als Zielorte interpretiert und die Flächen der Teilmodelle werden als Amplituden verwendet. Die zusätzlichen Parameter  $T, K$  fließen als zusätzliche Attribute in die Klassifikation für die Oberfläche und den Boden ein. Der empirisch ermittelte Klassifikationsalgorithmus berücksichtigt zunächst nur Punkte, deren Attribute ausgehende Ziele ( $T > 0$ ) mit großer Amplitude qualifizieren. Wenn es nur einen solchen Punkt gibt, gilt er als Wassersäule. Bei Vorliegen mehrerer Punkte wird der Punkt mit der zweithöchsten Amplitude für die Wassersäule verwendet, aber nur wenn er vor dem Punkt mit der höchsten Amplitude liegt. Die Wasseroberfläche wird dann als vordere Flanke der so bestimmten Wassersäule bestimmt. Für den Boden wird dann der Punkt mit der größten Amplitude aus den restlichen Punkten gewählt. Alle anderen Punkte bleiben ohne Klassifikation.

### 4.3 Wellenform als Pseudo-Punktwolke

Eine Betrachtung der Nachbarschaftsbeziehungen einzelner Wellenformprofile legt eine dreidimensionale Darstellung nahe, auf deren horizontaler Achse die Laufzeit und auf deren vertikaler Achse die laufende Nummer des Wellenformprofils aufgetragen ist. Die dritte Dimension wird durch Zuweisung eines Grauwertes gebildet, welcher der Amplitude des Abtastwertes der Wellenform entspricht. In Abb. 3 ist eine beispielhafte Darstellung von 100 Wellenformprofilen als Wellenformstapel zu erkennen.

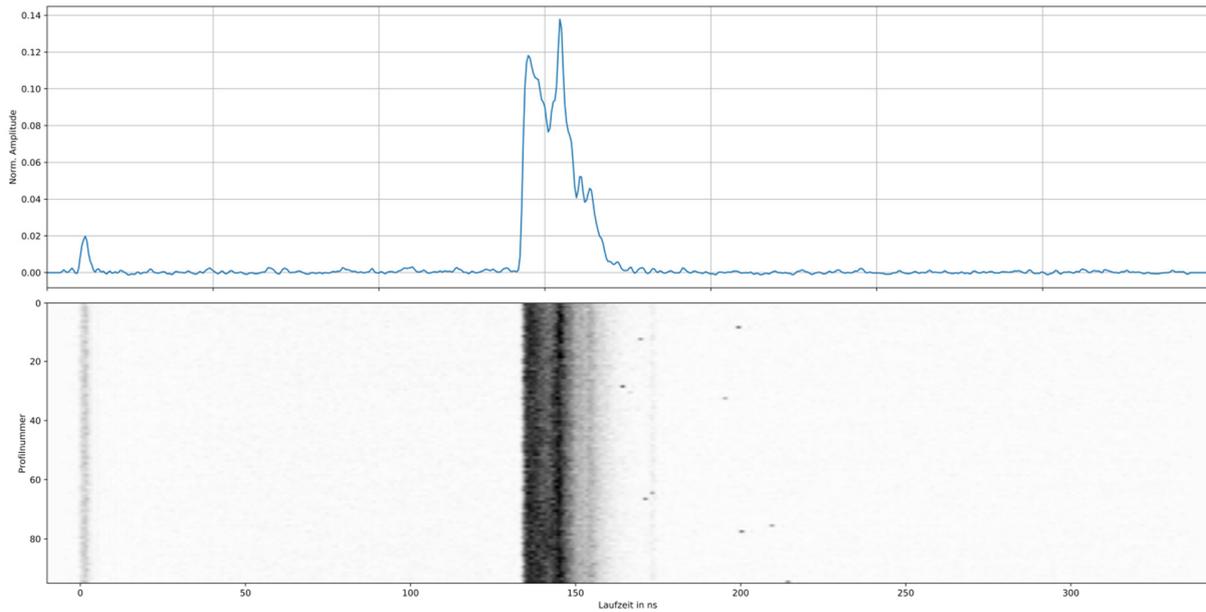


Abb. 3: Dreidimensionale Wellenformdarstellung als Wellenformstapel. Oben: Abtastwerte eines Wellenformprofils. Unten: Aufeinanderfolgende Wellenformprofile mit Amplituden als Grauwerte kodiert. Dunkle Stellen entsprechen großer Amplitude.

Fügt man dieser Darstellung eine weitere, vierte, Dimension hinzu indem man die mit Graustufen eingefärbten Wellenformprofile aus dem Sensor Koordinatensystem (Abb. 3) in das Projektkoordinatensystem bringt, erhält man eine Darstellung gemäß Abb. 4 die Ähnlichkeiten mit einem Vorhang aufweist.

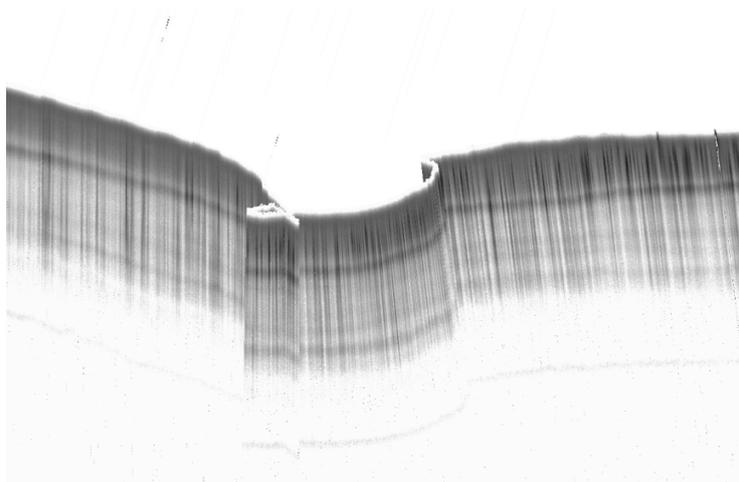


Abb. 4: Vierdimensionale (Vorhang-) Darstellung der Wellenformen als Pseudo Punktwolke. Dunkle Einfärbung bedeutet hohe Amplitude, helle Stellen niedrige Amplitude. Die Oberkante des Vorhangs entspricht der Wasseroberfläche.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Hafengeboden

Hauptanwendung des BDF-1 ist die Vermessung des unter Wasser liegenden Geländes. Die vorliegenden Daten wurden aber nicht zum Zweck einer umfassenden Vermessung des Hafengrundes erfasst, sondern nur um das Potential des Sensors für diesen Einsatzzweck abzuschätzen.

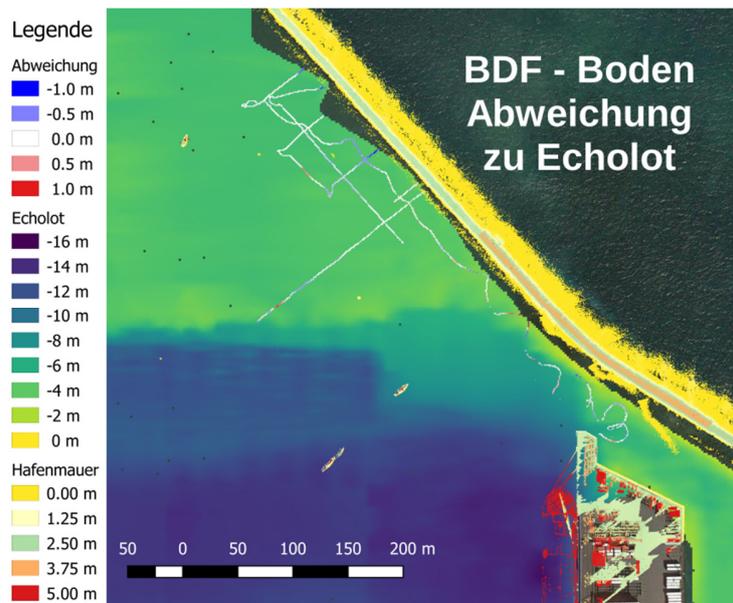


Abb. 5: BDF - Boden Abweichung. Der Abstand ist nur an wenigen Stellen größer als 0.5 m. Tiefen bis ca. 5 m bzw. 6 m wurden erfasst.

Die komplexen Wellenformen, siehe Abb. 6, mit einer hohen Anzahl von lokalen Maxima lassen die zuverlässige Detektion des Bodenechos zu einem nicht trivialen Problem werden. Mit einem auf dem im Abschnitt 4.2 beschriebenen Klassifikationsalgorithmus basierenden Algorithmus wurden die Oberflächen- und Bodenechos ermittelt.

Als Referenz für die Bodenprofile des BDF-1 stand eine Echolotvermessung aus dem Jahr 2016 zur Verfügung. Leider war es nicht möglich, diese Messungen für einen absoluten Vergleich zu verwenden, da trotz Referenzierung auf MLLW (Mean Lower-Low Water), in beiden Fällen, ein ungeklärter vertikaler Versatz von mehr als 3m bestehen blieb, wie uns vom Operator mitgeteilt wurde. Wir haben deshalb den mittleren Abstand zwischen Echolotung und (refraktions-korrigierten) BDF-1 Bodenpunkten bestimmt und vor dem Vergleich in Abzug gebracht. Die Echolotungen wurden durch Resampling einer Triangulation mit der Dichte von 1Pkt./m<sup>2</sup> interpoliert, neuerlich trianguliert und mit einem Laplace Kernel geglättet. Die Dreiecke wurden mit einer der Tiefe unter dem Projektwasserspiegel entsprechenden Skala eingefärbt. Der Projektwasserspiegel wurde so festgelegt, dass er mit der Wasseroberfläche der BDF-1 Messung zusammenfällt. In Abb. 5 ist die Differenz der BDF-1 Bodenpunkte und der interpolierten Echolot Fläche als hauptsächlich weiße Linie zu sehen. Obwohl die Struktur des Bodens nicht sehr ausgeprägt ist, kann man insbesondere in der Nähe der Anlegestelle erkennen, dass die Verläufe

innerhalb einer Abweichung von 0,5 m einander folgen. Im Vergleich mit Abb.2 ist zu sehen, dass Tiefen größer als 5 m bis 6 m nicht mehr erfasst wurden.

## 5.2 Dämpfungskoeffizient

Bei Zerlegung der Wellenformen wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, werden Dämpfungskoeffizienten  $K$  gewonnen. Abb. 6 zeigt ein Beispiel einer Zerlegung. Die Faltung der in Rot dargestellten Kurve mit der Systemwellenform (nicht dargestellt) ergibt die schwarze, durchgezogene Linie, in der Abbildung als Modell bezeichnet. Die Abtastwerte der Messung sind durch Kreise markiert, das Modell fällt in der Darstellung praktisch zusammen mit den Abtastwerten. Es ist zu erkennen, dass einem im Wesentlichen exponentiellen Abfall kleinere Abweichungen überlagert sind. Die vordere Flanke des exponentiellen Korpus definiert zugleich auch die Wasseroberfläche.

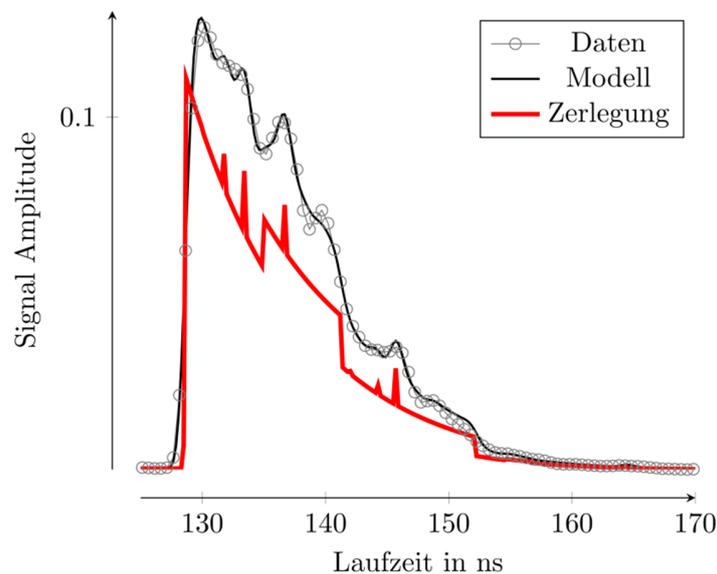


Abb. 6: Wellenformzerlegung. Das Modell entsteht aus der Faltung der Systemwellenform mit der Zerlegung.

Die Dämpfungskoeffizienten  $K$  haben die Dimension  $m^{-1}$  und ihre Kehrwerte  $Z = 1/K$  können als optische Tiefe interpretiert werden. Dieser Zusammenhang macht  $K$  bzw.  $Z$  interessant für die Messung der Schwebstoffe (siehe z.B. ZHAO et. al (2018)). Ermittelt man ein Histogramm aller im Datensatz enthaltenen optischen Tiefen, so erhält man zunächst eine Verteilung die zwei Maxima aufweist. Eine Unterteilung der optischen Tiefen in zwei Klassen, eine Klasse, die alle  $Z$  enthält, die von den Exponentialtermen stammen welche die Wasseroberfläche definieren, und eine Klasse, die alle anderen enthält, führt auf Abb. 7 (a) und (b).

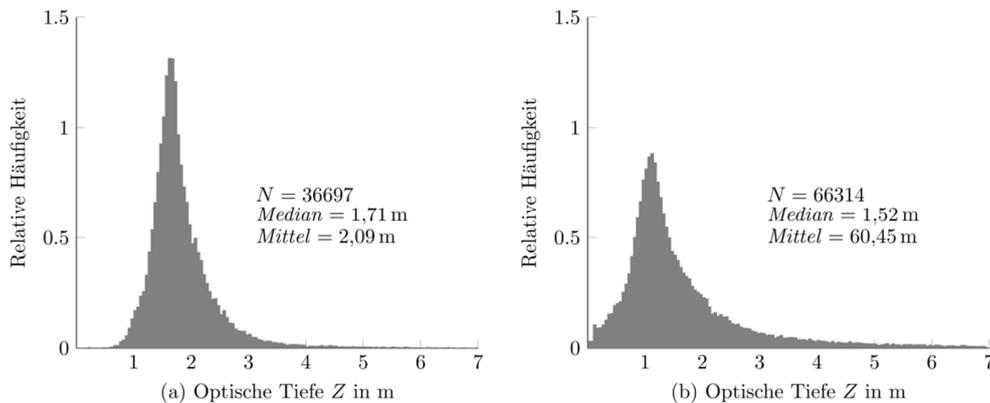


Abb. 7: Histogramme Optischer Tiefen, (a) Wasseroberfläche, (b) Unterwasser

Für den vorliegenden Datensatz existieren keine Referenzmessungen der Wassergüte oder eine Bestimmung der Secchi-Tiefe. Beachtet man den Zusammenhang (GUENTHER 1985)

$$Z_s K = \eta \quad (10)$$

worin  $Z_s$  die Secchi Tiefe ist und  $\eta$  ein Wert zwischen 1,1 und 1,7, der in komplexer Weise von den inherenten optischen Eigenschaften Dämpfung und Streuung des Wasserkörpers abhängt, so erhält man

$$Z_s = \eta Z. \quad (11)$$

Für  $Z_s$  erhält man so unter Berücksichtigung von Abb. 7 (a) Werte von 2,5 m bis 3 m. Aus den Beobachtungen aus Abschnitt 5.1 folgt, dass die erreichbare Tiefe ca. 5 m bis 6 m ist, entsprechend der doppelten Secchi-Tiefe, ein Wert, der mit den Erwartungen über die mögliche Performance des Sensors zusammenstimmt.

Die Verteilung der optischen Tiefen in Abb. 7 (b) weist im Unterschied zu (a) eine wesentlich höhere Asymmetrie zu größeren Werten auf, aber auch (a) zeigt eine nicht Gaußförmige Form. Während im Fall (a) die erreichte Tiefenperformance eine plausible Erklärung für den Median bzw. den Mittelwert liefert, haben wir für den Fall (b) keine Erklärung. Wir halten deshalb eine genauere systematische Untersuchung im Besonderen im Zusammenhang mit der im nächsten Abschnitt 5.3 behandelten Schichtstruktur für lohnenswert.

### 5.3 Schichtstruktur

Der untersuchte Datensatz zeigt Abweichungen, die der prototypischen Wellenform (Abb. 1) überlagert sind. Diese Abweichungen sind zunächst an der isoliert betrachteten Wellenform nicht von zufälligen Variationen zu unterscheiden. Ein Indiz dafür, dass es sich nicht um rein statistische, beispielsweise durch die Sensorelektronik verursachte, Störungen handelt, ist die Tatsache, dass die Abweichungen auch nach einer Summation von 100 aufeinanderfolgenden Wellenformen deutlich zu sehen sind.

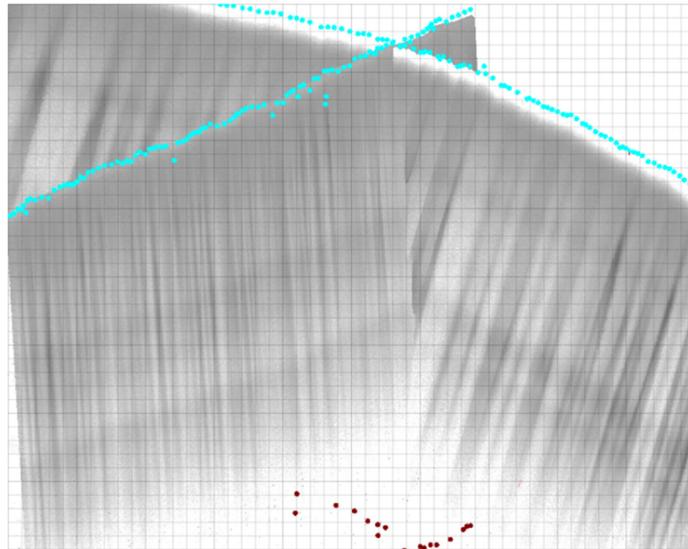


Abb. 8: Vorhangdarstellung der ungemittelten Wellenformen. Der Zeitabstand zwischen den beiden Profilen ist 74 Minuten. Der Vorhangdarstellung überlagert sind die ermittelte Oberfläche (blau) und der Boden (braun)

Die Grunddaten in Abb. 6 zeigen beispielsweise so eine über 100 Datensätze gemittelte Wellenform, entsprechend einer Zeitspanne von 25 ms bzw. 5 cm. Fluktuationen des Mediums die schneller ablaufen oder kürzere Ausdehnung aufweisen, werden durch den Mittelungsprozess erheblich gedämpft. Das Vorhandensein der Abweichungen lässt deshalb vermuten, dass diese Abweichungen Strukturen des Mediums, also der Wassersäule, offenbaren. Abb. 8 zeigt zwei, wie im Abschnitt 4.3 beschrieben, erzeugte Wellenformvorhänge der ungemittelten Wellenformen, denen die ermittelte Oberfläche (blau) und der Boden (braun) überlagert wurden. Es ist eine deutlich ausgeprägte horizontale Schichtstruktur zu erkennen die sogar bereits vor der Mittelung zutage tritt und nicht durch den Messprozess verursacht scheint. Darüber hinaus sind auch sehr langsame Veränderungen zu beobachten. Die beiden Profile in Abb. 8 weisen einen Unterschied in der Aufnahmezeit von 74 Minuten auf und wurden deshalb ausgewählt, da am Kreuzungspunkt zu erkennen ist, dass sich die Schichtung während dieser Zeit verändert hat. An anderen Kreuzungspunkten ist diese Schichtung unverändert geblieben.

Im Unterschied zu den horizontalen Strukturen sind die vertikalen Strukturen offensichtlich mit dem Messprozess korreliert, sie treten entlang der Laserstrahlrichtung auf. Benachbarte Wellenformen sind dabei aber einander nicht einfach nur über eine Skalierung ähnlich, was auf eine Schwankung der Empfindlichkeit des Sensors hindeuten würde, sondern zeigen auch strukturelle Unterschiede.

Bei der Zerlegung der Wellenform, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, fallen neben der Klassifikation der Oberflächen und Bodenpunkte auch weitere diskrete Punkte und ihnen zugeordnete Amplituden an. Stellt man diese Punkte als mit der Amplitude eingefärbte Punktwolke dar, so erhält man Abb. 9, die denselben Bildausschnitt wie Abb. 8 zeigt. Zweifellos erhöht diese Darstellungsart als reine Punktwolke nicht unbedingt die Übersichtlichkeit, dennoch hat sie aber den Vorteil, dass der Einfluss der System-Wellenform kompensiert wurde und die sich abzeichnende Linienstruktur mit konkreten geometrischen Orten unter der Wasseroberfläche identifiziert werden kann.

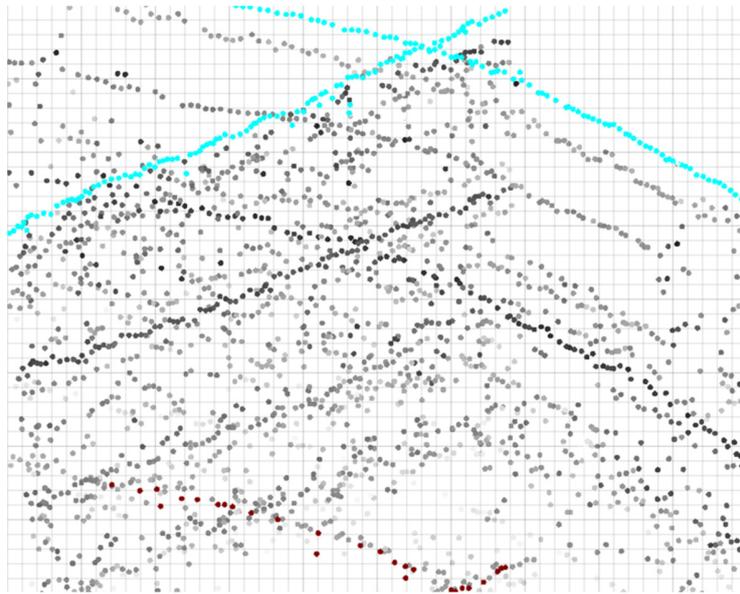


Abb. 9: Punktwolkendarstellung der Wellenformzerlegung.

Eine interessante Erweiterung der Darstellung über die Punktwolke hinaus wäre die Darstellung der in der Zerlegung gefundenen Exponential- und Puls-Segmente als Lineare, ausgedehnte, Elemente. Wir erwarten dadurch eine deutlicher hervortretende Schichtstruktur, vergleichbar der in Abb. 8.

Die zutage tretenden Strukturen legen es nahe, quantitative Zusammenhänge mit der Schwebstoffkonzentration zu untersuchen. Es ist auch die Frage zu stellen ob es einen Zusammenhang mit dem Temperaturprofil gibt und ob die Messdaten für eine Bestimmung der Wassergüte verwendet werden können.

#### 5.4 Offene See

Die Gültigkeit der Wellenformzerlegung nach Abschnitt 4.2 beruht unter anderem darauf, dass vorausgesetzt werden kann, dass das Superpositionsgesetz für die einzelnen Komponenten gilt. Bei sehr starker Aussteuerung des Empfängers, die bei großer optischer Tiefe oder Messung auf Land auftreten kann, ist die Voraussetzung für das Superpositionsgesetz aber nicht mehr erfüllt. Das obere Teilbild in Abb. 10 zeigt, dass das Bodenecho auf offener See so stark ist, dass der empfindliche Kanal, der für die Wellenformzerlegung herangezogen wird, so übersteuert wird, dass für die Messung ein zweiter im Gerät vorhandener, unempfindlicher Kanal, im Bild rot dargestellt, herangezogen wird. Trotz Übersteuerung werden die Wellenformen auch im empfindlichen Kanal weiter aufgezeichnet. Das Auftreten einer Übersteuerung kann nur Signalwerte verfälschen, die zeitlich gesehen nach dem Übersteuerungszeitpunkt liegen. Da das Signal von der Wasseroberfläche vor dem Übersteuerungszeitpunkt zufolge des Bodenechos empfangen wird, kann die Wasseroberfläche mit Hilfe der Wellenformzerlegung im empfindlichen Kanal bestimmt werden. Das untere Teilbild von Abb. 10 zeigt die solcherart bestimmte Wasseroberfläche, ohne die eine Brechungskorrektur der Bodenechos nicht möglich ist.

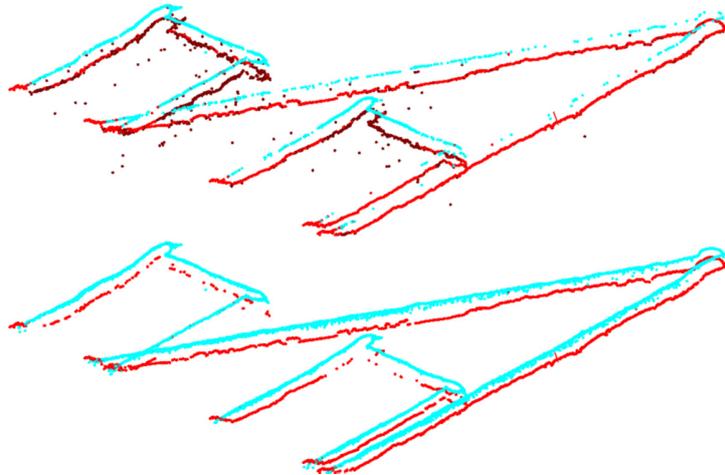


Abb. 10: Messprofile über offener See. In Rot das sehr starke Bodenecho. Oberes Teilbild: Wasseroberfläche wegen Übersteuerung nicht bestimmt. Unteres Teilbild: Durch teilweise Auswertung des übersteuerten Kanals wird eine Bestimmung der Wasseroberfläche möglich.

## 6 Fazit & Ausblick

Mit dem von der Firma RIEGL vor zwei Jahren vorgestellten BDF-1, (Bathymetric Depth Finder) ist es möglich georeferenzierte Profile im Wasserkörper aufzunehmen. Die Komplexität der Wellenformen erschwert einerseits zwar die Bestimmung der Bodenechos, zeigt andererseits aber einen Detailreichtum der räumlichen Strukturen. Wir haben gezeigt, dass eine Schichtstruktur in der Wassersäule zu Tage tritt von der angenommen werden muss, dass sie in einem Zusammenhang mit tatsächlichen stationären Inhomogenitäten des Mediums steht und nicht durch Fluktuationen und Signalrauschen verursacht wird. Wir erwarten, dass quantitative Zusammenhänge mit der Konzentration von gelösten Sedimenten oder Schwebstoffe unter der Oberfläche hergestellt werden können und regen Experimente an, mit denen diese Gesetzmäßigkeiten aufgedeckt werden können.

## 7 Dank

Die vorgestellte Arbeit beruht auf Datenmaterial, das uns von „US Army Corps of Engineers Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Remote Sensing/GIS Center of Expertise“ (Adam L. LeWinter, Peter J. Gadomski und David C. Finnegan) zur Verfügung gestellt wurde. Wir danken unserer Kollegin Andrea Spitzer und den Kollegen Alexander Haring und Christian Sevcik für ihre Unterstützung.

## 8 Literaturverzeichnis

- GORDON, H. R., 1982: Biodiversity: Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering. *Applied Optics*, **21**, 2996.
- GUENTHER, G. C., 1985: Airborne laser hydrography system design and performance factors. National Oceanic and Atmospheric Administration Rockville MD, USA. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a488936.pdf>.
- LEWINTER, A., PFENNIGBAUER, M., GADOMSK, P. J., FINNEGAN, D. C., SCHWARZ, R., TRUONG, M.-L. & PODOSKI, J. H., 2018: Unmanned aircraft system-based lidar survey of structures above and below the water surface. Hilo Deep Draft Harbor Breakwater, Hawaii. *Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XVI*, International Society for Optics and Photonics, **10779**, 107790Q.
- MALLET, C. & BRETAR, F., 2008: Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **64**, 1-16.
- PORTLAND, D. C. O. E., 2016: Condition Survey, Hawaii Hilo Harbour.
- 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**, 159-167.
- 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**, 100-112.
- ZHAO, X., ZHAO, J., ZHANG, H. & ZHOU, F., 2018: Remote Sensing of Suspended Sediment Concentrations Based on the Waveform Decomposition of Airborne LiDAR Bathymetry. *Remote Sensing*, **10**, 247.