

Die Möglichkeiten der Full Waveform für bathymetrische Airborne LiDAR Daten

**WOLFGANG DOBLER^{1,2}, FRANK STEINBACHER¹, RAMONA BARAN¹, WERNER BENDER¹,
MARCEL RITTER^{1,3} & WOLFGANG LEIMER¹**

Zusammenfassung: Heutige bathymetrische Laserscanner sind in der Lage, die gesamten Full-Waveform (FWF) Daten neben der Online-Prozessierung (OP) abzuspeichern. Für einen Laserscanflug liefern die FWF Daten zusätzliche, intrinsische Informationen, die einen vertieften Einblick in die Geometrie der Sohle erlauben. Der besondere Fokus liegt in jenem Sohlbereich für das Projekt Elbe mit einer Wassertiefe größer 0.5 m, die mit der OP teilweise nicht mehr erfasst werden können. Für die Entfaltung der FWF wird der Richardson-Lucy Algorithmus verwendet. Der Wasserkörper (ab einer Tiefe > 0.5 m) in den FWFs wird mit Hilfe eines e-Funktion Fittings bestimmt. Anschließend wird ein Waveform-Stacking durchgeführt, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Abschließend wurden dann mit dem Gradienten der FWF und einem variablen Schwellenwert Peaks in der FWF gesucht und in 3D Punktkoordinaten überführt. Die Datengrundlage für die FWF Auswertungen ist ein Teilabschnitt der Elbe in Deutschland, für den mit Hilfe von Echolotdaten auch die Höhengenaugigkeit der zusätzlich aus den FWFs extrahierten Sohlpunkte überprüft wurde.

1 Einleitung

Während eines bathymetrischen Laserscanflugs (STEINBACHER & AUFLEGER 2013) verarbeitet die Online-Prozessierung (OP) des Riegl-Lasers VQ880-G in Echtzeit die FWF zu geometrischen Koordinaten. Da die Aufnahmefrequenz 550 kHz beträgt, kann die OP keine rechenintensiven Auswertalgorithmen durchführen, um möglichst viele Objekte im Zielgebiet zu erfassen und als Punktkoordinate auszugeben. Hier bietet sich eine nachträgliche - wie seit Jahren schon vielfach angewendet - Offline-Prozessierung an (GUENTHER et al. 2000), um eine genauere Auswertung durchzuführen. Der Fokus der Auswertung liegt hier vor allem auf größeren Wassertiefen und einer höheren Punktdichte in tieferen Bereichen, in der die OP nur geringe oder keine Sohlpunkte ausgibt. Die einzelnen Schritte für eine zusätzliche Auswertung werden im Folgenden dargestellt und sind Bestandteil einer fertigen Massenprozessierungskette innerhalb der Software HydroVISH geworden.

2 Konvertierung vom Riegl-Format nach HDF5/F5

Nach erfolgter Streifenausgleichung und Georeferenzierung müssen derzeit die OP-Punktdateien und FWFs aus drei verschiedenen Dateien zusammengeführt werden. Anhand des GPS-Zeitstempels (in Wochensekunden) des emittierten Laserpulses (aus las-Datei) und der Entfernung

¹ Airborne Hydro Mapping GmbH, Feldstraße 1b, A-6020 Innsbruck

² Universität Innsbruck, Arbeitsbereich für Wasserbau, Technikerstr. 13, A-6020 Innsbruck

³ Universität Innsbruck, Institut für Informatik, Technikerstr. 21a, A-6020 Innsbruck

zwischen dem detektierten Punkt und der Trajektorie (aus sdc-Datei) kann der Zeitpunkt der Detektion innerhalb einer Waveform (wfm-Datei) errechnet werden. Die relevanten Datenfelder der Punkte und zugehörigen FWFs werden dann im F5-Layout (BENGER 2004; RITTER 2009), basierend auf dem HDF5-Format (THE HDF5 GROUP 2018), zur Weiterverarbeitung abgespeichert. Das aus dem High-Performance-Computing Bereich stammende Open-Source Format HDF5 erlaubt schnelle Zugriffe auf große Daten und flexible Datenstrukturen. Das F5-Layout bietet hierzu eine konkrete Organisation für raumzeitliche Daten und ermöglicht erst die lückenlose Extraktion und Verknüpfung aller Sensordaten.

3 Voruntersuchung

Die Offline-Prozessierung macht nur dann Sinn, wenn in den FWFs optisch ein Bodensignal zu erkennen ist. Hierfür werden mit dem Softwarepaket HydroVish der AHM GmbH (Derivat von Vish (BENGER et al. 2007)) alle FWFs entlang ihrer Richtungsvektoren gerendert. In Abb. 1 ist dabei klar zu erkennen, dass die OP nicht alle Sohlpunkte als Koordinaten ausgespielt hat und eine vertiefende Analyse der FWFs sinnvoll ist, da das physische Signal mit den Detektoreigenschaften - der sogenannten Systemwelle - verschmiert wird.

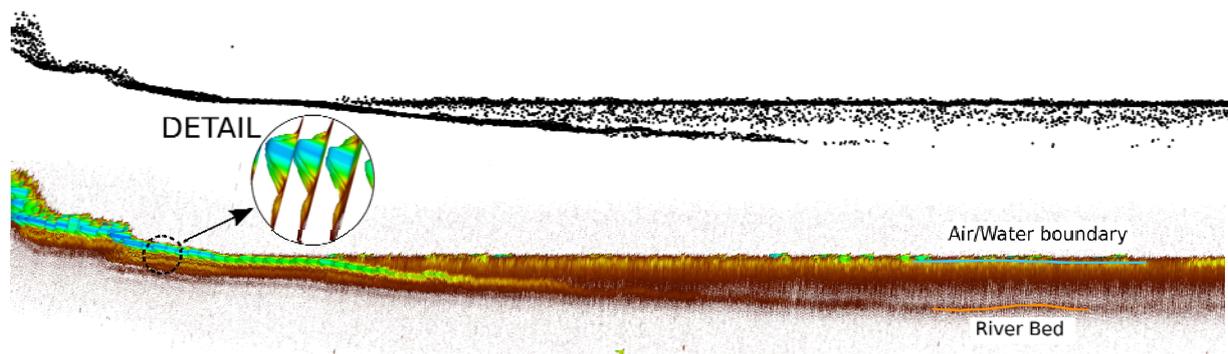


Abb. 1 oben: Querschnitt entlang der Elbe aus der Online-Prozessierung. Unten: Gerenderte FWFs entlang der Strahlrichtung. Sohlpeaks sind sichtbar, die wesentlich mehr umfassen als in der OP. In der Detailansicht ist der Doppelpeak aufgrund der Systemwelle sichtbar (siehe auch Abb. 6, Systemwelle).

4 Grobe Vorklassifizierung des Wasserkörpers mit Hilfe einer e-Funktion

Das grüne (490–575 nm) Laserlicht hat die Eigenschaft Wasser zu durchdringen (MOBLEY 1994) und kann daher verwendet werden, um die Sohle von Gewässern zu vermessen. Der vom Flugzeug aus emittierte Laserpuls wird als erstes an der Luft-Wasser Grenze teilweise reflektiert. Diese Reflexion ist meistens ein markanter Peak in der FWF und hängt vom Einfallswinkel und der Rauigkeit der Wasseroberfläche ab. Das restliche Laserlicht, das in den Wasserkörper eindringt, wird exponentiell gedämpft (PETZOLD 1972). Wenn genügend Laserlicht bis zur Sohle vordringt, ist ein zweiter - vor allem bei tieferen Gewässern - wesentlich kleinerer Peak in der FWF zu finden.

Der Amplitudenverlauf im Wasserkörper folgt dem Lambert-Beer'schen Gesetz:

$$A_s = A_0 e^{-\kappa s} \quad (1)$$

wobei A_s die Amplitude, s der Weg der FWF, A_0 die Anfangsamplitude und κ der Dämpfungskoeffizient ist.

Durch umformen erhält man κ :

$$-\ln\left(\frac{A_s}{A_0}\right) \frac{1}{s} =: \kappa(s) \quad (2)$$

Mit Gleichung (2) wird für jede Amplitude der FWF ein κ berechnet. Anschließend wird aus der Funktion $\kappa(s)$ der Median κ als repräsentativer Wert für die diskret gegebenen Werte s verwendet. Beispielhaft wurde in Abb. 2 das Einpassen der e-Funktion in eine FWF (hier Wasserkörper) dargestellt. Das Kriterium für ein erfolgreiches Einpassen der e-Funktion ist die integrierte absolute Differenz zwischen Amplitude A_s und dem dazugehörigen Wert aus der e-Funktion. Mit einem Schwellenwert für die Differenz wird dann festgelegt, ob es sich hier um einen Wasserkörper handelt, wie in Abb. 3 gezeigt.

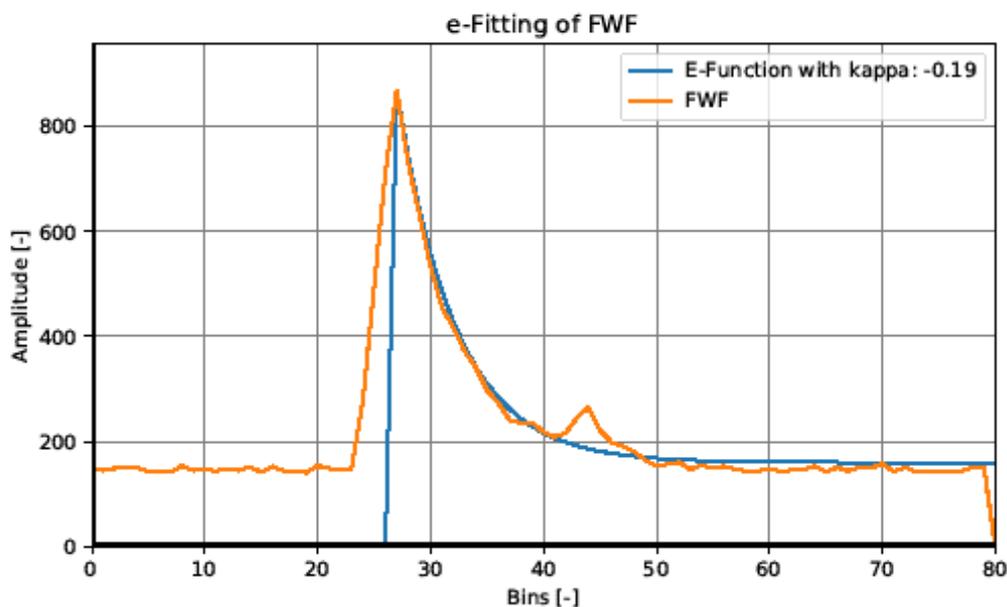


Abb. 2: Eingefügte e-Funktion am maximalen Peak

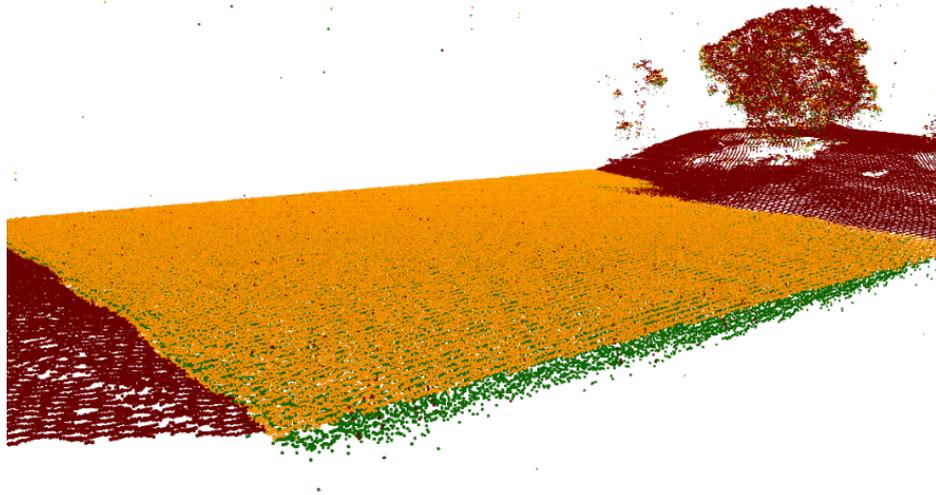


Abb. 3 : Klassifizierung des Wasserkörpers aufgrund eines Schwellenwertes für die Abweichung vom exponentiellen Verlauf der Amplitude: rot kein Wasserkörper; grün (letzter Peak) bzw. orange (erster Peak) Wasserkörper

5 Stapelung von benachbarten Wellenformen

Die Sohlpeaks einer FWF sind in vielen Fällen meistens sehr gering ausgeprägt (z.B. bei größeren Wassertiefen oder starke Trübung) und deren Amplitudenhöhe ist nur geringfügig größer als das Rauschen. Um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern, wird eine Stapelung von Wellenformen durchgeführt (STILLA et al. 2007). Bei diesem Ansatz werden benachbarte Wellenformen (Max. Entfernung: 25 cm, ähnlicher Richtungswinkel) addiert und anschließend ein Mittelwert gebildet. Zusätzlich werden die FWFs zum Hauptpeak verschoben. Es werden nur solche FWFs für die Stapelung herangezogen, die auch als Wasserkörper klassifiziert worden sind (Abb. 4 links). In Abb. 4 (rechts) ist dann eine gemittelte FWF dargestellt: Die orange Linie demonstriert einen gegenüber der blauen Referenz-FWF rauschverminderten Verlauf sowie zwei prominente Peaks (Übergang Luft nach Wasser und Sohlpeak).

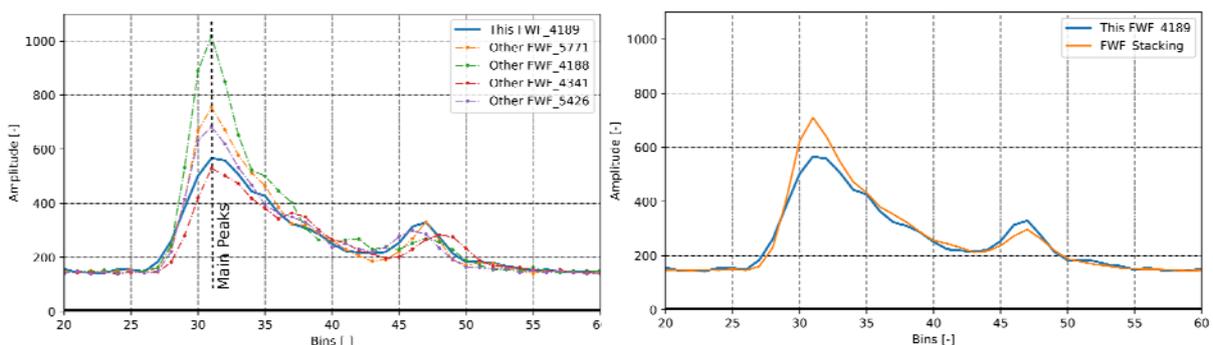


Abb. 4: Links: Mit der blauen Referenz-Waveform (Nr. 4189) werden benachbarte FWFs gesucht (strichpunktuelle Linien) und entlang des Hauptpeaks ausgerichtet. Rechts: Die gemittelte FWF in orange weist einen ruhigeren Verlauf auf als die blaue Referenz-Waveform.

6 Entfaltung der FWF

Die vom Sensor gemessene FWF ist eine Faltung der Systemwelle mit dem differentiellen Rückstreuquerschnitt (dRSQ oder Target Funktion). Dadurch kommt es typischerweise zu einer Verschmierung der Wellenform und zu einer Verringerung der Signalauflösung. Um nun die Objektform zu erhalten, findet man in der Literatur zahlreiche Möglichkeiten für die Entfaltung, wie z.B. Wiener Filter, B-Splines (RONCAT et al. 2010) oder auch mit Hilfe der Dekomposition (SCHWARZ et al. 2017). Für die Entfaltung der FWF-Daten des Elbe-Abschnittes haben wir uns hier für den Algorithmus nach Richardson-Lucy (RL) entschieden, der in anderen Projekten gute Ergebnisse lieferte (WU et al. 2011).

Da die Systemwelle der Firma Riegl in analytischer Form beschreibbar ist, wurde ein Upsampling der FWF um den Faktor 10 durchgeführt. Dadurch erhält man eine feinere Auflösung der FWF von $\Delta s = 17 \text{ cm}$ auf $\Delta s = 1,7 \text{ cm}$. In Abb. 5 ist eine Entfaltung beispielhaft durchgeführt worden: Die Target-Funktion besteht aus einer e-Funktion, die mit zwei nahe beieinander liegenden Peaks am Ende versehen ist. Die Target-Funktion wird nun mit der Systemwelle gefaltet und man erhält eine FWF mit einem verschmierten Doppelpeak am Ende. Anschließend wird ein normalverteiltes Rauschen (Größe der Schwankung wie in Abb. 2 vor dem Hauptpeak) aufgebracht und eine Entfaltung mit dem RL-Verfahren durchgeführt. In Abb. 5 ist erkennbar, dass durch das Upsampling das rückgefaltete Signal besser mit der Target-Funktion übereinstimmt (FWF zur Anschaulichkeit verschoben). Das Ergebnis für eine gemessene FWF ist in Abb. 6 dargestellt; die Peaks im rückgefalteten Signal sind gut zu erkennen.

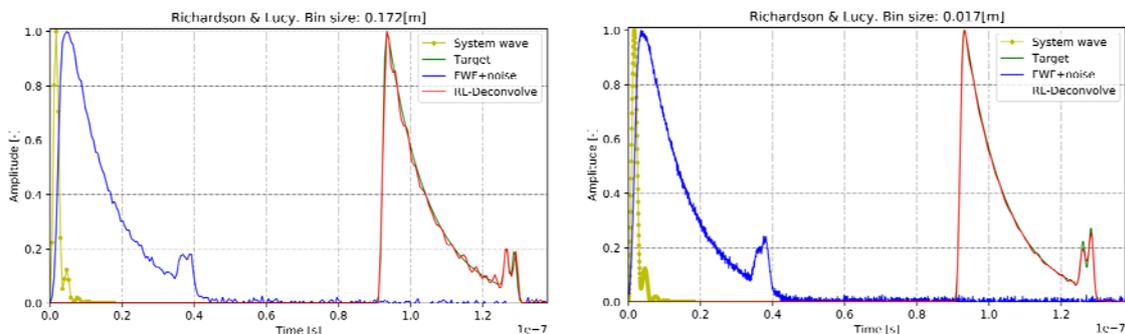


Abb. 5: Analytische Testfunktion: Target Objekt entspricht e-Funktion mit zwei Peaks an der Sohle: Rückentfaltung der Systemwelle mit FWF via Richardson-Lucy. Links: Originalgröße der FWF (Bin-Länge 17.2cm). Rechts: Gleiche Entfaltung mit verdichteter Punktzahl (Bin-Länge 1.72cm).

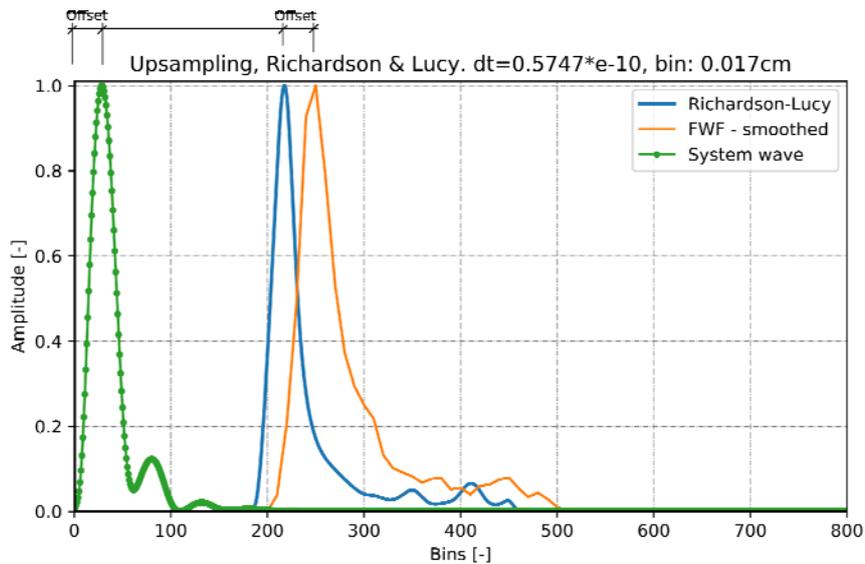


Abb. 6: Entfaltung an einer gemessenen FWF. Zwei Peaks in Sohlnähe kommen prominent zum Vorschein durch die Rückentfaltung. Die Größenordnung des Versatzes aufgrund der Faltung FWF mit Systemwelle ist zu erkennen.

Da die Entfaltung nach RL ein iteratives Verfahren ist und ein Upsampling um den Faktor 10 durchgeführt worden ist, ist die Berechnung für alle FWFs sehr zeitaufwändig. Den Ergebnissen vorausgreifend, ist auch untersucht worden, ob alternativ zur mathematischen exakten Entfaltung auch einfach nur der Versatz der Systemwelle berücksichtigt werden kann (siehe Abb. 6, Versatz). Das Ergebnis für die Elbe zeigt, dass eine Entfaltung in diesem Fall nicht notwendig ist und daher darauf verzichtet worden ist.

7 Peak-Detektion

Aus den FWFs werden Punktkoordinaten abgeleitet. Der verwendete Algorithmus basiert auf einem Gradientenfeld, in dem abhängig von einem Schwellenwert Peaks detektiert werden. Zusätzlich wird der Schwellenwert in tieferen Gewässern geringer angesetzt, um auch die schwach ausgeprägten Sohlpeaks zu finden (siehe Abb. 7).

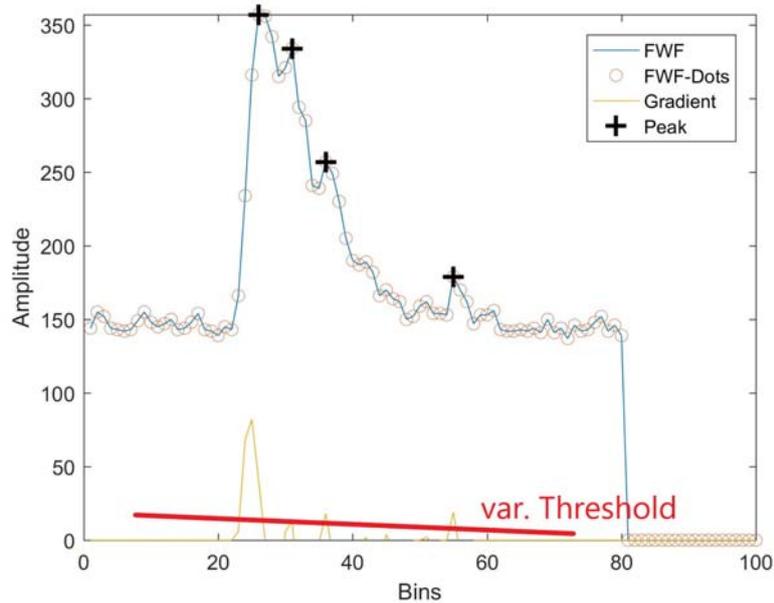


Abb. 7: Mit einem variablen Schwellenwert werden im Gradientenfeld Peaks detektiert.

In Abb. 8 ist der Vergleich mit der Online-Prozessierung (OP) dargestellt: Die OP zeigt den Beginn der Sohle an, weiter Richtung Flussmitte werden keine Sohlpunkte mehr detektiert. Mit der Gradientenauswertung werden mehr Sohlpunkte gefunden, auch wenn noch ein deutliches Rauschen um die Sohle vorhanden ist. Wesentlich besser ist die Auswertung mit der Stapelung der FWFs, bei der ein geringeres Rauschen zu erkennen ist (Suchradius 25 cm). Für die Auswertung mit der Entfaltung nach RL ist soweit keine wesentliche Verbesserung zu erkennen, auch wenn tendenziell das Rauschen etwas geringer ist.

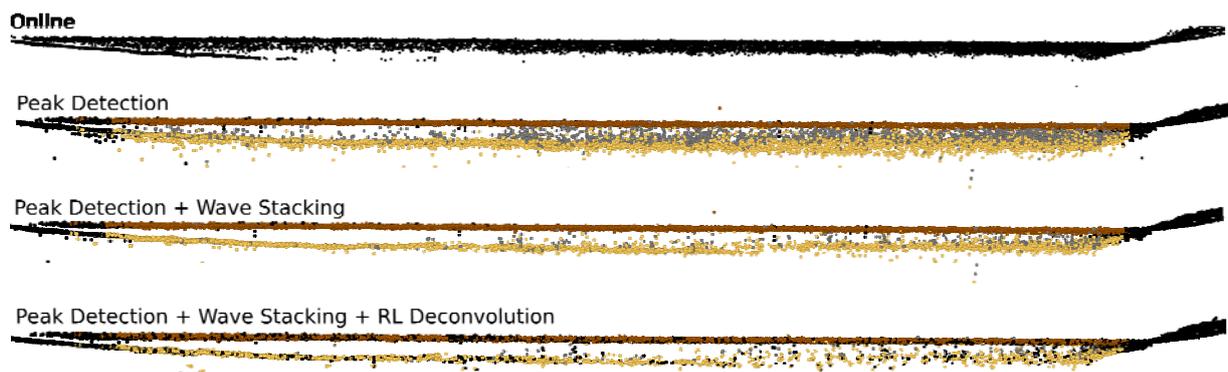


Abb. 8: Vergleich der verschiedenen Auswertemethoden mit der Online-Prozessierung.

8 Ergebnisse Projekt Elbe

Mit der gezeigten Vorgehensweise wurden die FWF-Daten eines 20km langen Abschnittes der Elbe bei Klöden inklusive einiger Nebengewässer ausgewertet. Die Befliegung erfolgte am 07.

September 2015 unter Verwendung des VQ880-G. Die Daten der Online-Prozessierung wurden bereits im Rahmen eines Pilotprojektes zur DGM-W-Modellierung verwendet (für WSA, BFG und BAW). Es wurden insgesamt FWFs für 18 Streifenpaare (Vor- & Rückstreifen) ausgewertet. An Hand dieser Auswertung wird der Mehrge Gewinn durch die nachträgliche Offline-Prozessierung der FWF-Daten deutlich (Abb. 9). In einem Profilschnitt wurden zudem die klassifizierte Offline-Sohlpunkte den Airborne Laser Bathymetry (ALB)-online-Sohlpunkten und den Echolotpunkten aus 2015 gegenübergestellt (Abb. 10). Es wird deutlich, dass Lücken zwischen den ALB-Online-Geländepunkten und Echolot 2015 geschlossen bzw. deren Größe deutlich reduziert werden können unter Berücksichtigung der Offline-klassifizierte Sohlpunkte aus der FWF. Zudem zeigt sich bei visueller Betrachtung eine gute Übereinstimmung zwischen FWF-Offline-Sohle und Echolot 2015. Eine statistische Auswertung zeigt zudem, dass die Differenz zwischen FWF-Offline-Sohle und Echolot 2015 eine Standardabweichung von 9 cm aufweist (Abb. 11).

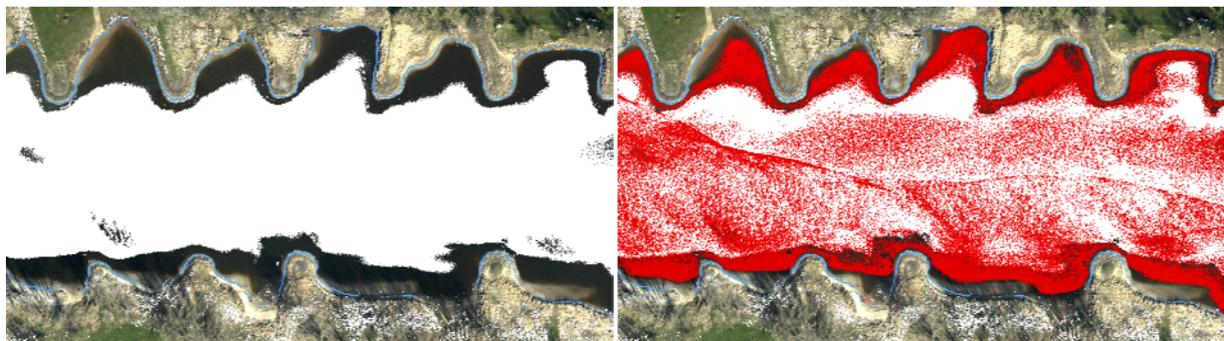


Abb. 9: Draufsicht Elbe. Blaue Linie ist Wasser-Land-Grenze. Links: Sohl- und Bodenpunkte aus der OP, rechts Sohlpunkte aus Offline-Prozessierung in rot

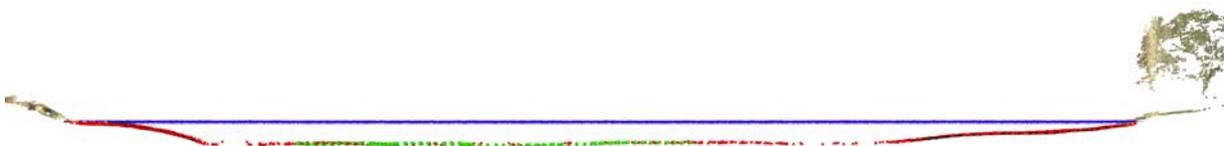


Abb. 10: Elbe-Querschnitt mit ALB-Online-Punkten (Gelände & Vegetation) eingefärbt nach RGB sowie Wasserspiegel in blau und Echolot 2015 in grün. In rot sind die Offline-klassifizierte Sohlpunkte zum Vergleich aus der FWF eingeblendet.

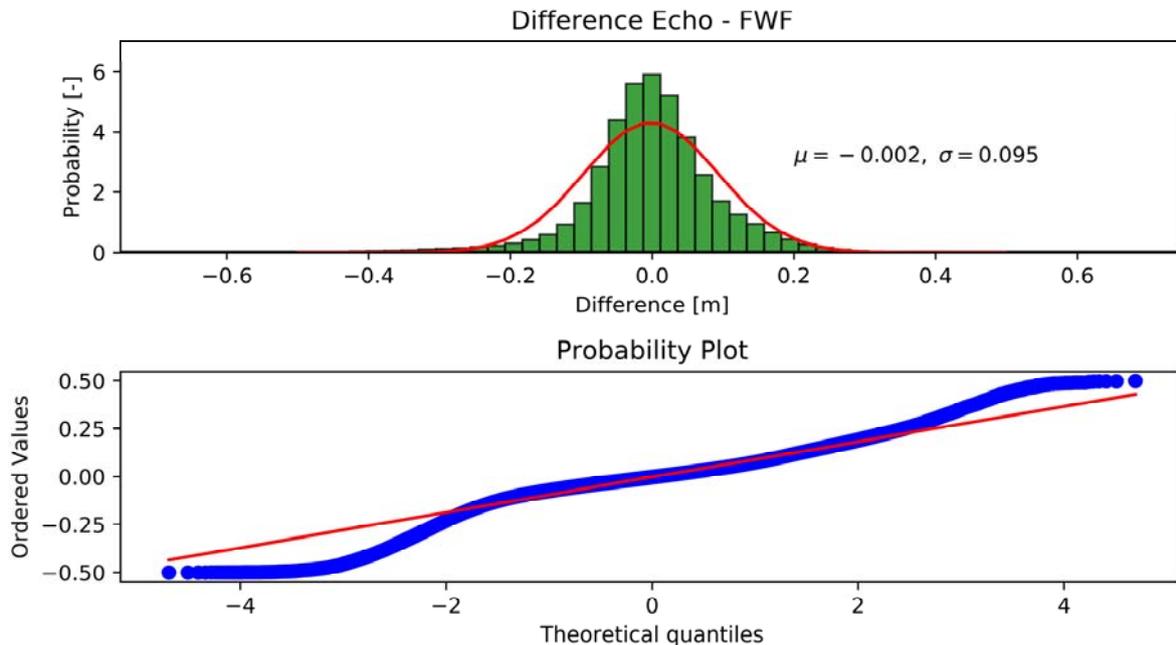


Abb. 11: Oben: Differenzen der gerasterten Echolot-Daten mit den FWFs: Die Standardabweichung beträgt 9 cm. Unten: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Differenzen gegen die theoretischen Quantilwerte aus einer Normalverteilung.

9 Zusammenfassung

Für das Projekt Elbe wurden die FWF-Daten als Offline-Prozessierung ausgewertet. Mit der Prozessierungs- und Visualisierungssoftware HydroVish können die massiv größeren Rohdaten (Faktor 100 im Vergleich zu ausschließlich Koordinaten) der FWF vollständig und flächendeckend dargestellt werden. Dies erlaubt als erster Schritt eine Abschätzung ob eine Offline-Prozessierung überhaupt notwendig ist. Anschließend wurde mit dem beschriebenen Exponentialansatz der Wasserkörper aus den Wellenformen klassifiziert. Mit den daraus resultierenden FWFs wurde dann eine Stapelung durchgeführt. Damit konnte das Signal-Rausch Verhältnis verbessert werden. Eine Entfaltung nach Richardson-Lucy (RL) wurde anhand eines Testquerschnitts durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass eine Entfaltung nach RL zu keiner signifikanten Verbesserung der Ergebnisse in diesem Projektdatensatz führte. Daher wurde hierauf verzichtet. Die Peaks in der FWF wurden stattdessen über den Gradienten mit Hilfe eines variablen Schwellenwertes bestimmt. Das Ergebnis der Punktkoordinaten aus der FWF wurde mit den Echolot-Daten der Elbe verglichen: Die Standardabweichung beträgt hier 9 cm und liegt in der Größenordnung der Genauigkeit der LiDAR-Daten (10 cm).

Aktuelle Untersuchungen befassen sich im Zuge des integrativen Aufbaus einer topobathymetrischen Prozesskette für LiDAR Daten (vom Sensor zum Datenprodukt in einer Prozessumgebung) mit der Einsatzfähigkeit von modernen Methoden aus dem Bereich der Artificial-Intelligence, wie z.B. DeepLearning (DAVIS & MARCUS 2016) für Klassifizierung oder Peak-Detektion.

10 Literaturverzeichnis

- BENGER, W., 2004: Visualization of General Relativistic Tensor Fields via a Fiber Bundle Data Model. Berlin: Lehmanns Media-LOB.
- BENGER, W., RITTER, G. & HEINZL, R., 2007: The Concepts of VISH. In 4. High-End Visualization Workshop, Obergurgl, Tyrol, Austria, June 18-21, 2007, 26-39). Berlin, Lehmanns Media-LOB.de.
- DAVIS, E. & MARCUS, G., 2016: The scope and limits of simulation in automated reasoning. *Artificial Intelligence*. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2015.12.003>
- GUENTHER, G. C., CUNNINGHAM, A. G., LAROCQUE, P. E. & REID, D. J., 2000: Meeting the Accuracy Challenge in Airborne Lidar Bathymetry. EARSel EProceedings.
- MOBLEY, C. D., 1994: Light and Water : Radiative Transfer in Natural Waters. Light and Water : Radiative Transfer in Natural Waters. <https://doi.org/10.1002/9781118622179>
- PETZOLD, T., 1972: Volume Scattering Functions for Selected Ocean Waters. Scripps Institution of Oceanography. <https://doi.org/10.5811/westjem.2013.7.18472>
- RITTER, M., 2009: Introduction to HDF5 and F5. Baton Rouge. Retrieved from <https://www.cet.lsu.edu/cet-trs/download.php?file=CCT-TR-2009-13/CCT-TR-2009-13.pdf>
- RONCAT, A., BERGAUER, G. & PFEIFER, N., 2010: Retrieval of the backscatter cross-section in full-waveform LIDAR data using B-splines. The Int. Archives Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., **38**(3B), 137-142.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s41064-017-0018-z>
- STEINBACHER, F. & AUFLEGER, M., 2013: Airborne hydromapping: A new approach to manage hydraulics, morphology and ecology. International Journal on Hydropower and Dams, **20**, 74-77.
- STILLA, U., YAO, W. & JUTZI, B., 2007: Detection of weak laser pulses by full waveform stacking. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **36**(3/W49), 25-30.
- THE HDF5 GROUP, 2018: Hierarchical data format version 5.
- WU, J., VAN AARDT, J. A. N. & ASNER, G. P., 2011: A comparison of signal deconvolution algorithms based on small-footprint LiDAR waveform simulation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **49**(6), 2402-2414. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2103080>