

Korrektur der Signaldämpfung und Analyse zur Bestimmbarkeit der Gewässertrübung in Laserbathymetrie-Daten

KATJA RICHTER¹, PATRICK WESTFELD¹, HANS-GERD MAAS¹ & ROBERT WEIB²

Zusammenfassung: Seit einigen Jahren werden Laserbathymetriesysteme erfolgreich zur Erfassung der Topografie von Gewässerbettflächen eingesetzt. Die Leistungsfähigkeit des Messverfahrens wird allerdings durch die Gewässertrübung eingeschränkt. Beim Durchgang des Laserpulses durch die Wassersäule wird die Intensität des emittierten und reflektierten Laserpulses durch Absorptionsprozesse im Wasser verringert. In Abhängigkeit von der Gewässertrübung und -tiefe wird die Signalintensität im unteren Bereich der Wassersäule geringer. Bei stärkerer Gewässertrübung oder in tieferen Bereichen kann das am Gewässerboden reflektierte Echo mit klassischen Auswertemethoden nicht mehr detektiert werden. Eine Kompensation des Einflusses der Signaldämpfung kann hier – je nach Detektionsverfahren – eine Möglichkeit zur Erhöhung des Anteils detektierter Bodenpunkte darstellen.

Darüber hinaus wird ein erster Ansatz vorgestellt, aus dem Verlauf der aufgezeichneten Signale pulsweise integrale Trübungsparameter für das Gewässer abzuleiten. Diese flächenhafte Bestimmung der Gewässertrübung kann eine sehr interessante Alternative zu konventionellen Verfahren darstellen, bei denen Trübungsparameter nur stichprobenhaft erfasst werden.

1 Einleitung

Zu den Aufgaben der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung gehört neben der Verkehrssicherung auch ein aktives Wasserstraßenmanagement, das eine optimale Bewirtschaftung der Bundeswasserstraßen sicherstellt. Eine Grundlage hierfür bilden genaue Informationen über die Geometrie der Wasserstraßen, die in Form digitaler Geländemodelle mit Wasserlauf (DGM-W) bereitgestellt wird. Eine besondere Herausforderung stellen dabei die Flachwasserbereiche dar, die mit konventionellen Methoden nur sehr aufwendig zu erfassen sind. Mit Laserbathymetriesystemen kann die Geometrie der Wasserwechselzonen und anderer Flachwasserbereiche wesentlich wirtschaftlicher vermessen werden. Untersuchungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Kooperation mit dem Wasser- und Schifffahrtsamt Dresden zeigten allerdings, dass Standardauswertemethoden zur Ableitung der Gewässergeometrie nur eingeschränkt geeignet sind, da das Gewässerbodenecho nur in wenigen Fällen detektiert wurde (WEIB 2015). Datengrundlage sind die im Rahmen eines Pilotprojekts mit den bathymetrischen ALS Systemen AHAB Chiroptera und RIEGL VQ820G durchgeführten Befliegungen der Bundeswasserstraße Elbe im Bereich Klöden (Abbildung 1). Im Projektgebiet befinden sich neben der Elbe einige Altarme, die ebenfalls für die Untersuchungen interessant sind.

¹ TU Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, D-01069 Dresden; E-Mail: [katja.richter1, patrick.westfeld, hans-gerd.maas]@tu-dresden.de

² Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, D-56068 Koblenz

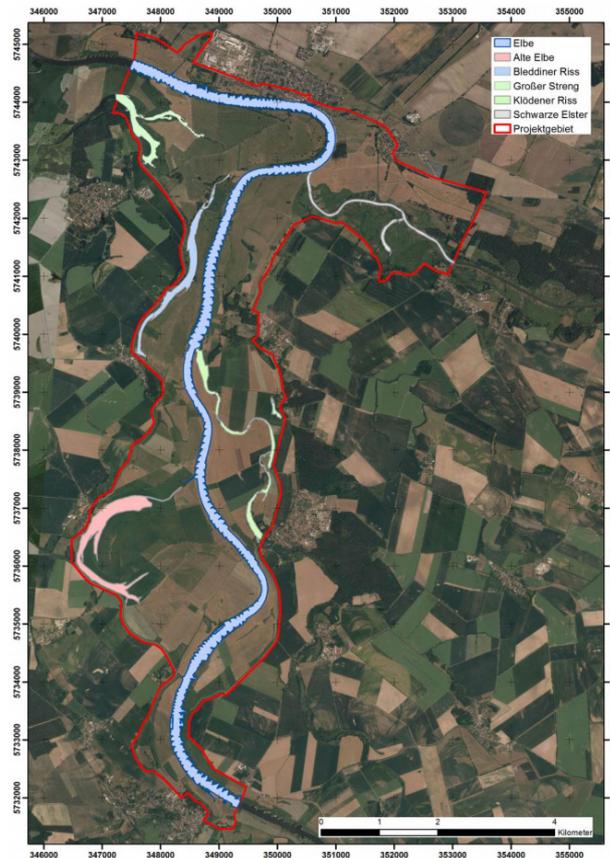


Abb. 1: Untersuchungsgebiet (Elbe km 184-203) zwischen Mauken und Elster/Wittenberg

Um das Potential der erfassten Bathymetriedaten voll auszuschöpfen, müssen neue Auswertemethoden entwickelt werden. Die verbesserte Interpretation der aufgezeichneten Waveform-Daten erfordert ein genaues Verständnis der Interaktion zwischen elektromagnetischer Strahlung und Wassersäule. Die Ausbreitung des emittierten Laserpulses innerhalb der Wassersäule ist durch Absorptions- und Streuprozesse an Wassermolekülen sowie an verschiedenen Partikeln und Schwebstoffen charakterisiert (GUENTHER et al. 2000). Während bei der Absorption ein Teil der Energie verloren geht, gelangt durch die Streuung ein Teil der Energie zurück zum Empfänger (Volume Backscatter). Bei den Streuprozessen wird in Einfach- und Mehrfachstreuung unterschieden (DONEUS et al. 2013). Die Mehrfachstreuung ist abhängig von der Gewässertrübung und beeinflusst vor allem die Amplitude des Signals, weniger ihren zeitlichen Verlauf (HARSDORF et al. 1999). Wird der Messprozess als ideal betrachtet, ergibt sich das gemessene Signal P_r aus der Faltung von emittiertem Signal P_e und differentiellem Rückstreuquerschnitt je Volumeneinheit σ (HARSDORF et al. 1999). Die Mehrfachstreuung wird in diesem mathematischen Modell vernachlässigt. Der differentielle Rückstreuquerschnitt charakterisiert die Eigenschaften des vom Laserpuls beleuchteten Mediums und kann mit geeigneten Entfaltungstechniken aus emittiertem und reflektiertem Signal rekonstruiert werden. Er stellt die Grundlage für die in Kapitel 2 beschriebene Modellierung der Signaldämpfung und anschließende Ableitung zusätzlicher Gewässerbodenpunkte dar.

Neben der Gewässergeomtrie ist auch die Bestimmung von Trübungsparametern von Interesse. Die Gewässertrübung wird konventionell durch Schwebstoffmessungen und Sichttiefenmessungen regelmäßig an definierten Positionen erfasst. Die gemessenen Werte sind jedoch nicht für das gesamte Gewässer repräsentativ, da zum Teil sehr große lokale Trübungsvariationen auftreten. Außerdem hängen die Messergebnisse stark von subjektiven Einflussfaktoren auf den Messvorgang ab. Eine Ableitung der Trübungsparameter aus den Laserbathymetriedaten ermöglicht demgegenüber eine objektivierete flächenhafte Analyse der Gewässertrübung. Die entwickelten Methoden und Ergebnisse werden in Kapitel 3 dargestellt.

2 Modellierung der Signaldämpfung

Ursache der Signaldämpfung ist die Abschwächung der Intensität des emittierten Laserpulses durch Absorptionsprozesse beim Durchgang des Laserpulses durch die Wassersäule. Dadurch ist die Signalintensität im unteren Bereich der Wassersäule kleiner. Diese Abschwächung kann vereinfacht mit der Gleichung für die Strahlungsdämpfung (Gleichung 1) beschrieben werden, die auf dem Lambert-Beer-Gesetz basiert.

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-\varepsilon \cdot d} \quad \text{Gleichung 1}$$

Dabei ist I_0 die Intensität des einfallenden Laserpulses und I_1 die Pulsintensität nach Passieren der Wassersäule. Mit ε und d werden der Absorptionskoeffizient und die Länge der durchdrungenen Wassersäule beschrieben. Der Absorptionskoeffizient ist von der Wellenlänge λ des Lasers abhängig. Nach Bestimmung des Absorptionskoeffizienten aus dem Signalverlauf kann die Signaldämpfung korrigiert werden. Der Vergleich zwischen theoretischem Modell und realem Signal (Abbildung 2) zeigt jedoch, dass die Signaldämpfung in der Realität nicht kontinuierlich verläuft.

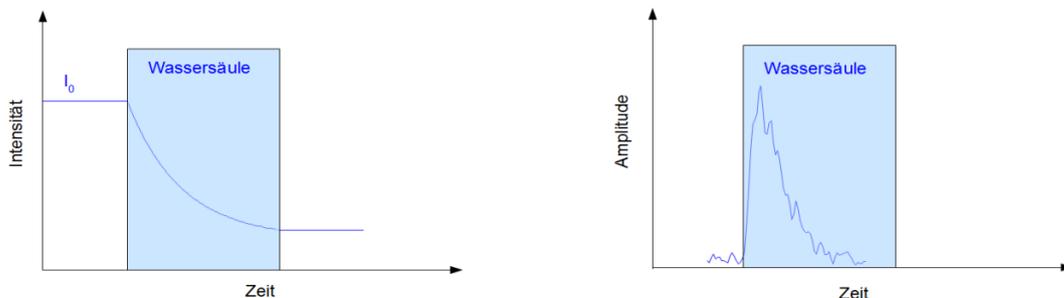


Abb. 2: Vergleich Modell Signaldämpfung (links) und reale Signaldämpfung (rechts)

Durch Analyse der jeweiligen Pulshistorie kann für jede Waveform eine individuelle Dämpfungskorrektur direkt aus dem differentiellen Rückstreuquerschnitt abgeleitet werden. Grundidee des Korrekturverfahrens ist das schrittweise Anheben der Waveform-Intensitätswerte in den unteren Bereichen der Wassersäule mit Hilfe geeigneter Korrekturfaktoren. Die Korrekturfaktoren c_i sind vom Anteil p_i der Pulsintensität abhängig, der im oberen Bereich der Wassersäule absorbiert wurde (Gleichung 2).

$$c_i = \frac{1}{(1-p_i)} \quad \text{Gleichung 2}$$

Um diesen Anteil p_i zu berechnen, werden als Referenzwert Informationen über die an der Wasseroberfläche eintreffende Energie benötigt. Diese Informationen lassen sich nicht aus der digitalisierten emittierten Waveform ableiten, da der Zusammenhang zwischen digitalisierter Amplitude und tatsächlich emittierter Energie unbekannt ist. Daher wurden zwei in vorangegangenen Studien entwickelte Methoden getestet, mit denen der Referenzwert mit statistischen Mitteln aus dem Datensatz selbst abgeleitet werden kann (RICHTER et al. 2015). Der Anteil p_i berechnet sich aus dem Verhältnis der Amplitude des differentiellen Rückstreuquerschnittes an der Abtaststelle A_i zum Referenzwert Ref (Gleichung 3).

$$p_i = \frac{A_i}{Ref} \quad \text{Gleichung 3}$$

Zur Beurteilung der Dämpfungskorrektur können die relativen Korrekturfaktoren c_i als Funktion der Zeit visualisiert werden. Für das auf dem Lambert-Beer-Gesetz basierende theoretische Modell hat die Korrekturfunktion einen streng exponentiellen Verlauf (Abb. 3, links). Die aus dem Rückstreuquerschnitt abgeleitete Korrekturfunktion (Abb. 3, rechts) hat grundsätzlich einen ähnlichen, jedoch an die individuelle Pulshistorie angepassten Verlauf.

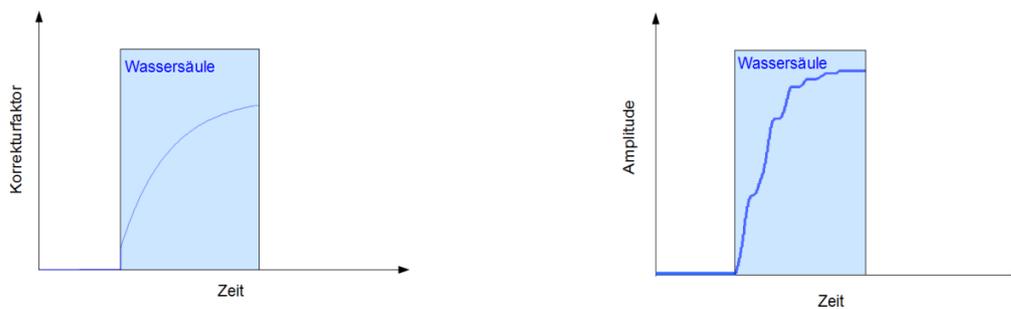


Abb. 3: Vergleich Korrekturfunktion Modell (links) und reale Korrekturfunktion (rechts)

2.1 Referenzwertbeschaffung

2.1.1 Automatische Methode

Die automatische Methode zur Ermittlung des Referenzwertes basiert auf der Annahme, dass das an der Wasseroberfläche eintreffende Signal dem maximalen rückgestreuten Signal entspricht. Der Referenzwert wird aus der Analyse der Integrale der differentiellen Rückstreuquerschnitte abgeleitet. Die Größe des Integrals hängt direkt mit der Gewässertrübung und damit der Signaldämpfung zusammen. In einem trüben Gewässer wird das Signal stark gedämpft und das Integral fällt klein aus. In einem klaren Gewässer fällt die Dämpfung geringer aus und das Integral hat einen entsprechend größeren Wert. Weitere Einflussfaktoren sind die ebenfalls von der Gewässertrübung abhängige Reflektivität des Wassers sowie das Vorhandensein von Gewässerbodenreflektionen im Signal. Abbildung 4 zeigt die Histogramme aller im Untersuchungsgebiet auftretenden Intergale. Um statistische Fehler zu reduzieren, wird der Referenzwert im Abstand von 2σ zum Mittelwert bestimmt. Es ergeben sich der Wert $Ref=59,0$.

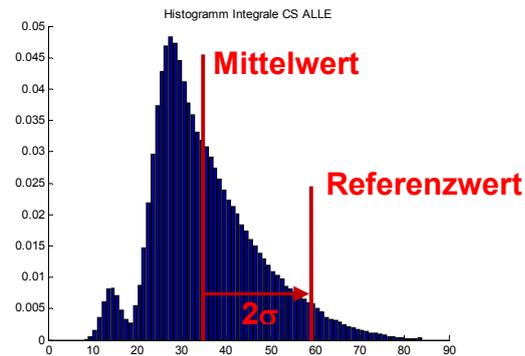


Abb. 4: Histogramm Integrale

Ein großer Vorteil der Methode ist die komplette Automatisierung. Allerdings führt die getroffene Annahme tendenziell zu einer Unterschätzung des Referenzwertes. Da die maximalen rückgestreuten Signale ebenfalls von Dämpfungseffekten beeinflusst sind, fällt der ermittelte Referenzwert tendenziell etwas kleiner aus als der wahre Wert. Außerdem können im Signal enthaltene Reflektionen am Gewässerboden das Verfahren beeinflussen. Reflektivitätsunterschiede zwischen den unterschiedlich trüben Gewässern werden vernachlässigt.

2.1.2 Interaktive Methode

Die Interaktive Methode stellt ein alternatives Verfahren dar, mit dem sich Referenzwerte unabhängig von gedämpften Signalen ableiten lassen. Sie basiert auf der Annahme, dass das an der Wasseroberfläche eintreffende Signal nach einer Reflektivitätsanpassung der Reflektion an einer Referenzfläche entspricht. Um den Referenzwert zu bestimmen, werden zunächst im gesamten Untersuchungsgebiet geeignete Referenzflächen mit bekannter Reflektivität gesucht. Im Datensatz sind mehrere urbane Bereiche mit zahlreichen Asphaltstraßen vorhanden, die sich als Referenzfläche anbieten. Abbildung 5 zeigt eine der insgesamt 17 verwendeten Referenzflächen.

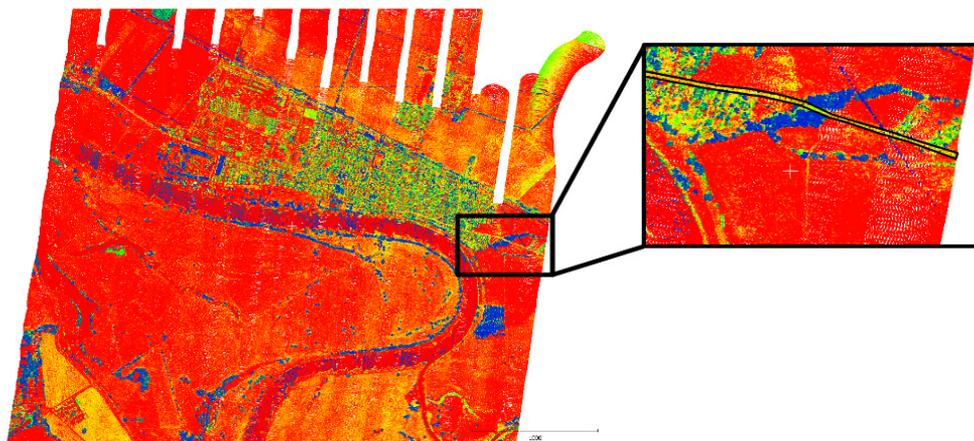


Abb. 5: Beispiel Referenzfläche

Die Analyse der Integrale der Rückstreuquerschnitte aller Waveforms der Referenzflächen ergibt einen Mittelwert $M=104,7$ für die Reflektion an Asphalt. Durch eine Reflektivitätsanpassung (Gleichung 4) werden aus diesen Mittelwerten die gesuchten Referenzwerte ermittelt. Die relative Reflektivität für Asphalt ($\rho_{Asphalt}$) und Wasser (ρ_{Wasser}) können der Literatur entnommen werden (Pfennigbauer, 2011 und Liew, 2001). Es ergibt sich der Referenzwert $Ref=69,8$.

$$Ref = MW \cdot \frac{\rho_{Wasser}}{\rho_{Asphalt}} \quad \text{Gleichung 4}$$

Die interaktive Methode zur Referenzwertbestimmung basiert wie die automatische Methode auf der Annahme, dass alle Gewässer im Untersuchungsgebiet die gleiche Reflektivität aufweisen und ρ_{Wasser} als gemeinsamer Wert angesetzt werden kann. Beide Methoden stützen sich gegenseitig, da sie unabhängig voneinander ähnlich Ergebnisse liefern. Die mit der automatischen Methode ermittelten Werte fallen aus den oben genannten Gründen allerdings tendenziell zu klein aus. Für die Dämpfungskorrektur werden daher die mit der interaktiven Methode bestimmten Referenzwerte verwendet. Der mit der interaktiven Methode verbundene Aufwand kann im Vergleich zum Aufwand konventioneller Methoden zur Bestimmung der Gewässertrübung an diskreten Punkten als gering bezeichnet werden.

2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der entwickelten Dämpfungskorrekturmethode werden an Hand eines Beispiel-Signals präsentiert. In Abbildung 6 (oben) ist eine reflektierte Waveform im Untersuchungsgebiet dargestellt. Obwohl ein Peak im Bereich des Gewässerbodens erkennbar ist, wurde in der Standardauswertung durch den Systemhersteller für dieses Signal kein Bodenpunkt detektiert. Bereits im rekonstruierten differentiellen Rückstreuquerschnitt (Abbildung 6, unten, blau) ist der Bodenpeak besser zu erkennen und unterscheidet sich nach der Dämpfungskorrektur (Abbildung 6, unten, grün) deutlicher von anderen Peaks. Ein unerwünschter Nebeneffekt der Entfaltung ist die Verstärkung des Signalrauschens. Dadurch können beim rekonstruierten differentiellen Rückstreuquerschnitt auch negative Amplituden A_i auftreten, deren Verarbeitung natürlich nicht sinnvoll ist. Stattdessen wird $p_i=0$ gesetzt, so dass an diesen Abtaststellen keine Dämpfungskorrektur durchgeführt wird.

Im nächsten Schritt werden die Peaks im Rückstreuquerschnitt detektiert und Koordinaten für Wasseroberfläche und Gewässerboden abgeleitet. Dabei stellt die Unterscheidung zwischen echten Gewässerbodenreflektionen und durch die Entfaltung verstärktem Rauschen eine Herausforderung dar, die eine Weiterentwicklung der bestehenden Algorithmen erfordert. Das Potential der entwickelten Methode zeigt sich bereits bei der Betrachtung eines Gewässerprofils im Untersuchungsgebiet. In Abbildung 7 (oben) ist ein Ausschnitt der mit Standardmethoden aus dem reflektierten Signal abgeleiteten Punktwolke dargestellt. Die Farbcodierung entspricht der Amplitude der detektierten Peaks. Während die Wasseroberfläche mit Ausnahme der Randbereiche komplett erfasst ist, wird der Gewässerboden nur durch wenige Punkte im Flachwasserbereich repräsentiert. Die Ableitung der Gewässerbodenpunkte aus den rekonstruierten Rückstreuquerschnitten (Abbildung 7, unten) liefert deutlich mehr Bodenpunkte für die gesamte Gewässersohle. Für die geplante Validierung stehen Daten eines Fächerecholotes zur Verfügung.

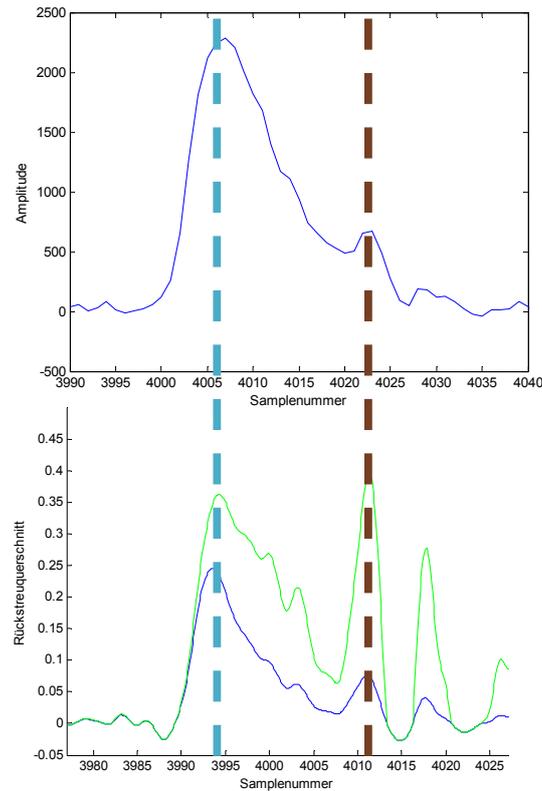


Abb. 6: Vergleich reflektiertes Signal (oben), differentieller Rückstreuquerschnitt (unten, blau) und dämpfungskorrigierter differentieller Rückstreuquerschnitt (unten, grün)

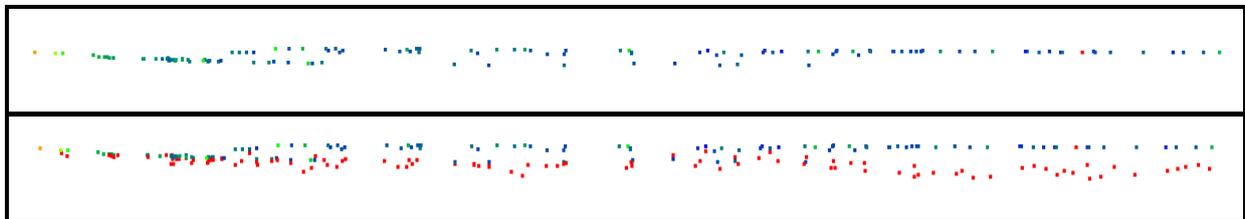


Abb. 7: Gewässerprofil, oben: Punktwolke Standardauswertung, unten: Punktwolke Standardauswertung überlagert mit zusätzlich aus diff. Rückstreuquerschnitt abgeleiteten Gewässerbodenpunkten (rot)

3 Ableitung Trübungsparameter

3.1 Methode

Das Lambert-Beer-Gesetz (Gleichung 1) kann auch eine Grundlage für die Ableitung von Trübungsparametern bilden, wobei der Absorptionskoeffizient ε ein (integrales) Maß für die Gewässertrübung darstellt. Um den Absorptionskoeffizienten zu bestimmen, wird eine Exponentialfunktion in das Signal eingepasst. Da der exponentiell abfallende Trend in der reflektierten Waveform deutlicher ausgeprägt ist als im rekonstruierten differentiellen Rückstreuquerschnitt, wird die Funktionsapproximation direkt am Ausgangssignal durchgeführt

und liefert Schätzwerte für die Parameter I_0 und ε . Abbildung 8 zeigt die Einpassung der Exponentialfunktion in das Signal der Wassersäule.

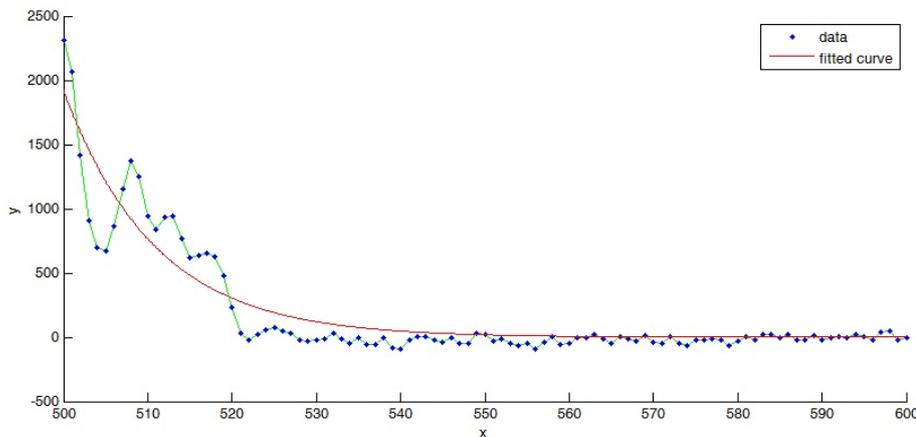


Abb. 8: Approximation Exponentialfunktion (rot) in Signal der Wassersäule (grün)

3.2 Ergebnisse

Die Gewässertrübung wurde für jede Waveform im Untersuchungsgebiet abgeleitet. Abbildung 9 zeigt eine Visualisierung der für den Altarm Bleddiner Riss ermittelten Absorptionsparameter in einer farbcodierten Darstellung. Die Koordinaten entsprechen dem an der Wasseroberfläche detektierten Punkt, die Farbcodierung dem ermittelten Absorptionsparameter, dabei entspricht blau einer geringen und rot einer starken Gewässertrübung. Der ermittelte Absorptionsparameter ist dabei zunächst ein rechnerischer Wert ohne konkrete physikalische Bedeutung und ist dementsprechend dimensionslos. Für die weitere Verwendung des Parameters für limnologische Analysen ist er anhand von Referenzmessungen zu skalieren (vgl. Kap. 3.3).

3.3 Validierung

Für die Validierung der entwickelten Methode stehen Referenzwerte in Form von lokalen Sichttiefenmessungen an unterschiedlichen Standorten im Bereich der Elbe und der Altarme zur Verfügung. Die Sichttiefenmessung mittels Secchischeibe liefert metrische Werte (SECCHI, 1866). Im Gegensatz dazu ergeben sich aus der Ableitung der Absorptionsparameter aus der bathymetrischen ALS-Befliegung dimensionslose Koeffizienten. Die Messergebnisse lassen sich somit nicht direkt vergleichen. Für die Validierung des entwickelten Messverfahrens muss daher geprüft werden, ob zwischen den Messwerten der beiden Methoden ein stetiger Zusammenhang besteht. Um diesen Zusammenhang nachzuweisen, wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt, in der die Ergebnisse der Sichttiefenmessung mit den mittleren Absorptionskoeffizienten der einzelnen Gewässer im Untersuchungsgebiet verglichen wurden. Der berechnete Korrelationskoeffizient ist ein Maß für die Stärke eines eventuell vorhandenen linearen Zusammenhangs. Da er sich mit $r=0,9994$ dem Wert 1 nähert, liegt mit großer Wahrscheinlichkeit ein funktionaler Zusammenhang zwischen Sichttiefe und Absorptionskoeffizienten vor. Die statistische Signifikanz des vermuteten Zusammenhangs wurde mit einem t-Test geprüft.

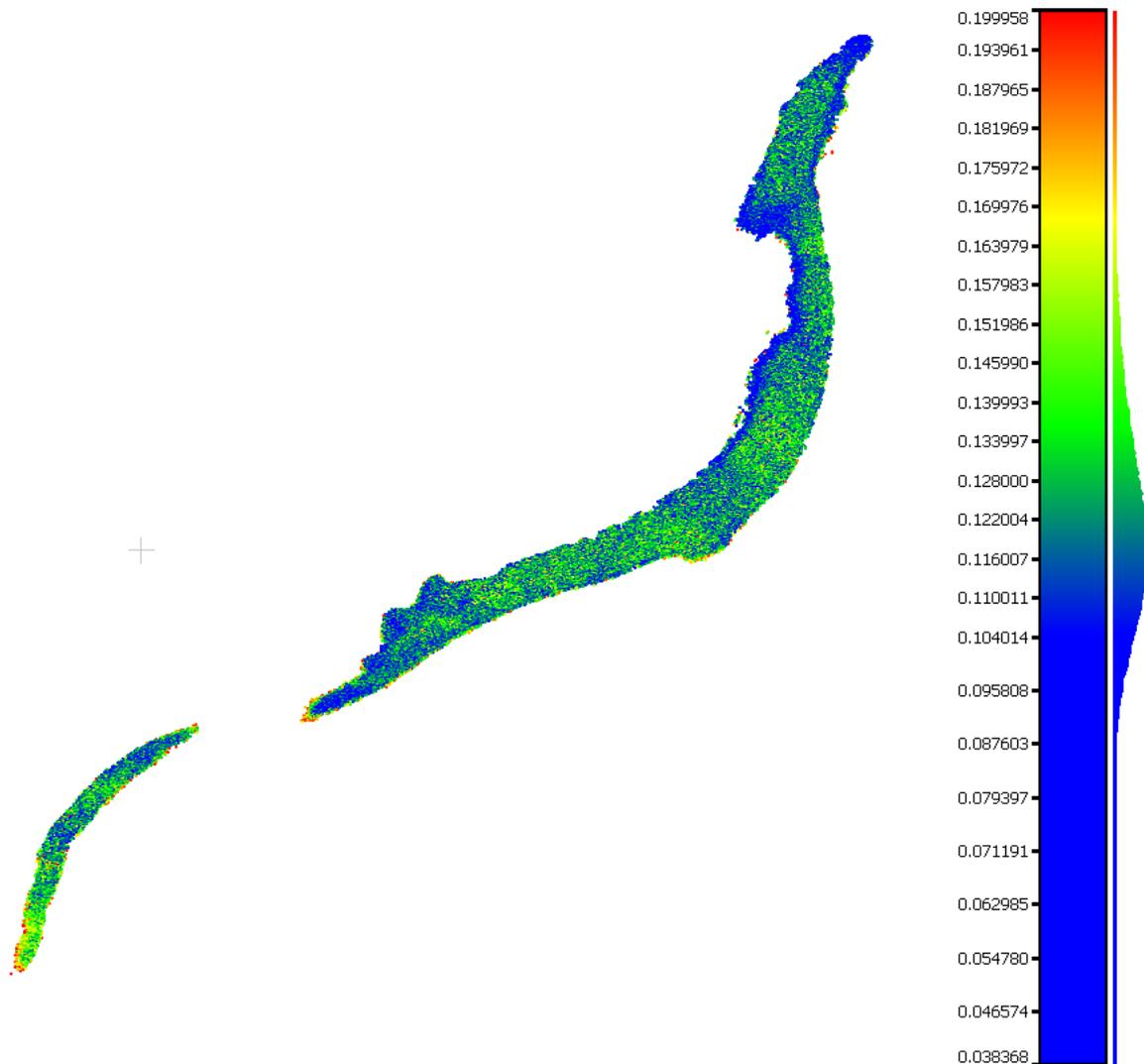


Abb. 9: Visualisierung Absorptions-parameter Altarm Bleddiner Riss

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die entwickelte Methode zur Modellierung und Korrektur der Signaldämpfung in Laserbathymetrie-Daten bildet die Grundlage für eine verbesserte Extraktion der Gewässerbodentopographie. Auf dieser Basis können verbesserte Algorithmen zur Ableitung zusätzlicher Bodenpunkte aus den dämpfungskorrigierten Rückstreuquerschnitten entwickelt werden, welche anhand von Referenzdaten zu validieren sind. Für die Beurteilung der Genauigkeit der Gewässerbodenpunkte müssen auch lokale Welleneffekte berücksichtigt werden. Anders als in vielen Anwendungen der Laserbathymetrie angenommen, können bei entsprechenden Genauigkeitsanforderungen auch kleinere Wellenmuster nicht vernachlässigt werden, da sie zu einem signifikanten Lage- und Tiefenversatz am Gewässerboden führen (WESTFELD et al. 2016).

Die flächenhafte Bestimmung integraler Gewässertrübungsparameter durch die Analyse des Signalverlaufs der Laserbathymetriewaveformdaten stellt einen großen Fortschritt zu konventionellen Verfahren dar, bei denen Trübungsparameter nur stichprobenhaft vor Ort erfasst werden. In dieser ersten Untersuchung konnte eine hohe Korrelation zwischen aus den Waveforms abgeleiteten Trübungsparametern und durch konventionelle Secchischeibenmessungen ermittelten Referenzwerten festgestellt werden. Das Verfahren ist nicht nur für die Untersuchung von Binnengewässern sondern auch für meereskundliche Fragestellungen wie beispielsweise die Untersuchung von Meeresplankton (SULLIVAN et al. 2012) relevant.

5 Literaturverzeichnis

- DONEUS, M., DONEUS, N., BRIESE, C., PREGESBAUER, M., MANDLBURGER, G. & VERHOEVEN, G., 2003: Airborne laser bathymetry - detecting and recording submerged archaeological sites from the air. *Journal of Archaeological Science* **40** (4), 2136-2151.
- GUENTHER, G.C., CUNNINGHAM, A.G., LAROCQUE, P.E. & REID, D.J., 2000: Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry. *Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR*, Dresden/FRG. 2000.
- HARSDORF, S. & REUTER, R., 1999: Laser remote sensing in highly turbid waters: validity of the lidar equation. *Industrial Lasers and Inspection (EUROPTO Series)*, International Society for Optics and Photonics, 369-377.
- LIEW, S.C., 2001: Optical Remote Sensing. Tutorial, <http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/optical.htm>
- PFENNIGBAUER, M. & ULLRICH, A., 2011: Multi-wavelength airborne laser scanning. *Proceedings of the International Lidar Mapping Forum, ILMF*, New Orleans.
- RICHTER, K., BLASKOW, B., STELLING, N. & MAAS, H.-G., 2015: Reference value provision schemes for attenuation correction of full-waveform airborne laser scanner data. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (2015), II-3/W5, 65-72.
- SECCHI A., 1866: Esperienze per determinare la trasparenza del mare. Sul moto ondoso del mare e su le correnti di esso specialmente su quelle littorali, A. Ciadi (ed.), Rome, 258-288.
- SULLIVAN, J., TWARDOWSKI, M., DONAGHAY, P., RINES, J., MCFARLAND, M., TALAPATRA, S., KATZ, J., CHURNSIDE, J., WEIDEMANN, A., 2012: Biological thin layers: history, ecological significance and consequences to oceanographic sensing systems. *SPIE Defense, Security, and Sensing*, International Society for Optics and Photonics.
- WEIß, R., 2015: Erprobung der Laserbathymetrie an Bundeswasserstraßen im Binnenbereich. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, Band 24, T. Kersten (Hrsg.), 35. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 16.-18. März 2015 an der Universität zu Köln, Tagungsband auf CD-ROM, 27-34.
- WESTFELD, P., RICHTER, K. MAAS, H.-G., WEIß, R., 2016: Analysis of the Effect of Wave Patterns on Refraction in Airborne LiDAR Bathymetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **41** (1/W2).