

Möglichkeiten und Grenzen der Bathymetrieableitung mittels Single Photon LiDAR

GOTTFRIED MANDLBURGER^{1,2}

Zusammenfassung: Neben klassischen Laserbathymetriesensoren bietet auch die Single Photon LiDAR Technologie prinzipiell die Möglichkeit der Erfassung von Gewässertiefen. In diesem Beitrag wird die Eignung von Single Photon LiDAR zur Bathymetrieableitung sowohl von der Theorie her als auch anhand praktischer Beispiele einer Datenerfassung mit dem Leica SPL100 in Wien und Niederösterreich erörtert. Die prinzipielle Eignung begründet sich durch die Verwendung grüner Laserstrahlung, dem konischen Scanmechanismus mit konstanter Strahlrichtung gegenüber der Horizontalen und der prinzipiellen Mehrzielfähigkeit der eingesetzten sehr empfindlichen Detektoren. Einschränkungen ergeben sich wegen der nicht vorhandenen Wellenformaufzeichnung und aufgrund der potenziellen Signalinteraktion eng benachbarter Laserstrahlen und deren zugeordneter Empfänger. Je nach Gewässertrübe konnte bei der durchgeführten Datenerfassung entweder limitierte Eindringtiefe oder unzureichende Signalantwort von der Wasseroberfläche festgestellt werden. Die erzielten Messtiefen liegen im Bereich der 1-fachen Secchi Tiefe.

1 Einleitung

Bei konventionellen Laserscannern wird die rückgestreute Laserstrahlung von genau einem Empfänger erfasst. Die Distanzmessung entlang des Laserstrahls erfolgt dabei entweder durch geeignete Hardwarekomponenten direkt im Gerät oder durch die Aufzeichnung des gesamten zeitlichen Verlaufs des rückgestreuten Signals. Diese Art der Signalerfassung und -verarbeitung wird als Full Waveform (FWF) Laserscanning (MALLET & BRETAR 2009) bezeichnet. Alternativ dazu können Echodetektion und Entfernungsmessung auch geräteintern auf Basis von Schwellwertsensitiven Hardwarekomponenten erfolgen. Unabhängig von der Art der Signalverarbeitung spricht man in beiden Fällen von linear-mode LiDAR (Light Detection and Ranging), da die verwendeten Avalanche Photodioden (APD) im linearen Bereich operieren, bei dem die empfangene optische Strahlungsstärke in etwa linear zum elektrischen Signal am Ausgang des Empfängers ist.

Demgegenüber sind in den vergangenen Jahren Systeme auf den Markt gekommen, die eine Objekterfassung beim Eintreffen eines oder weniger Photonen erlauben. Die Technik wird als Single Photon Sensitive LiDAR bezeichnet (DEGNAN 2002; AGISHEV et al. 2013; KIM et al. 2013). Im Kontext der Topographieerfassung mittels Flugzeuglaserscanning haben sich zwei spezifische Varianten etabliert: (i) Geiger-Mode LiDAR (GmLiDAR) (ROMANO 2015) und (ii) Single Photon LiDAR (SPL) (DEGNAN 2016). MANDLBURGER et al. (2019) beschreiben beide Verfahren detailliert und diskutieren die Unterschiede zu konventionellem wellenformbasierten Laserscanning.

¹ TU Wien, Department für Geodäsie and Geoinformation, Wiedner Hauptstr. 8-10, A-1040 Wien, Österreich, E-Mail: gottfried.mandlbürger@geo.tuwien.ac.at

² Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, Geschwister-Scholl-Str. 24D, D-70174 Stuttgart, E-Mail: gottfried.mandlbürger@ifp.uni-stuttgart.de

Die als SPL bezeichnete Technologie verwendet Laserstrahlung im grünen Bereich des elektromagnetischen Spektrums ($\lambda=532$ nm), welches die inhärente Eigenschaft aufweist, Wasser zu durchdringen. Ein am Markt verfügbares Gerät dieser Type ist der Leica SPL100. Obgleich der Hersteller den Sensor ausschließlich für die Erfassung von Topografie konzipiert hat, weist das System aufgrund (i) der verwendeten grünen Wellenlänge, (ii) der hohen Sensitivität des Empfängers und (iii) des kreisförmigen Scanmusters (Palmer Scanner, off-nadir Winkel: $10-20^\circ$) bathymetrische Fähigkeiten auf. DEGNAN et al. (2016) berichten beispielsweise von einer Eindringtiefe von 15 m bei sehr klaren antarktischen Gewässern und 4 m bei trübere Verhältnissen (Chesapeake Bay, Maryland, USA).

Ziel des vorliegenden Beitrages ist es daher, einerseits die technischen Grundlagen wie auch die Grenzen der Single Photon LiDAR basierten Ableitung von Gewässertiefen zu erläutern und andererseits anhand konkreter Messdaten zu illustrieren. Der Artikel ist wie folgt strukturiert: Abschnitt 2 behandelt die Theorie der Single Photon LiDAR basierten Detektion von Laserechos mit speziellem Hinblick auf den Wasserbereich. Konkrete Untersuchungsgebiete in Wien und Niederösterreich (Donau, Pielach) werden in Abschnitt 3 vorgestellt und die Ergebnisse der entsprechenden Befliegung mit dem Leica SPL100 in Abschnitt 4 präsentiert und diskutiert. Der Artikel schließt mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse in Abschnitt 5.

2 Theorie

Im Gegensatz zu konventionellem Laserscanning, wo für jeden Laserstrahl genau ein Detektor zur Verfügung steht, kommen sowohl bei GmLiDAR als auch bei SPL Detektorarrays zum Einsatz. Bei GmLiDAR trifft dabei die reflektierte Strahlung eines stark aufgeweiteten Laserpulses auf ein Feld von Einzelphoton-sensitiven Empfängerzellen, einem sogenannten Geiger-mode Avalanche Photodiode (GmAPD) array (CLIFTON et al. 2015). Es handelt sich also um eine Range Kamera mit beispielsweise 32×128 Zellen (ROMANO 2015). Jede einzelne Zelle agiert dabei als binärer Detektor, der nach dem Auslösen eines ersten Echos bis zum Zurücksetzen des gesamten Empfängerarrays für den nächsten Laserpuls unempfindlich ist (ULLRICH & PFENNIGBAUER 2016; MANDLBURGER et al. 2019). Dieses Messprinzip eignet sich daher wegen der mangelnden Mehrzielfähigkeit nicht für Bathymetrieerfassung, da das von Wasserflächen zurückgestreute Lasersignal prinzipiell aus Komponenten von der Wasseroberfläche, der Wassersäule und des Gewässerbodens besteht. Außerdem kommt bei GmLiDAR infrarote Laserstrahlung zum Einsatz, die generell nicht ins Wasser eindringt.

Bei der SPL Technologie kommen ebenfalls mehrere Empfänger pro Laserschuss zum Einsatz. Hier wird allerdings ein wasserdurchdringender grüne Laserpuls durch ein diffraktives, optisches Element in ein Bündel von 10×10 Teilstrahlen aufgefächert (STOKER et al. 2016, MANDLBURGER et al. 2019). Jeder einzelne Teilstrahl ist stark gebündelt. Die Strahldivergenz beträgt 0.08 mrad (LEICA 2020), wodurch der Durchmesser des Abtastflecks jedes Teilstrahls bei einer typischen Flughöhe von 4000 m über Grund ca. 30 cm beträgt. Für jeden Teilstrahl steht ein eigener Empfänger bestehend aus mehreren hundert Einzelphoton-sensitiven Zellen (Silicon Photo-Multiplier, SiPM), zur Verfügung (DEGNAN 2018). Einzelne dieser Geiger-mode Zellelemente können dabei bei der Signalantwort von der Wasseroberfläche durchbrechen, andere erst später beim Eintreffen

des reflektierten Signals vom Gewässergrund. Diese Technologie ist daher inhärent mehrzielfähig, was die Grundvoraussetzung für die korrekte Erfassung von Unterwasser-Topografie darstellt.

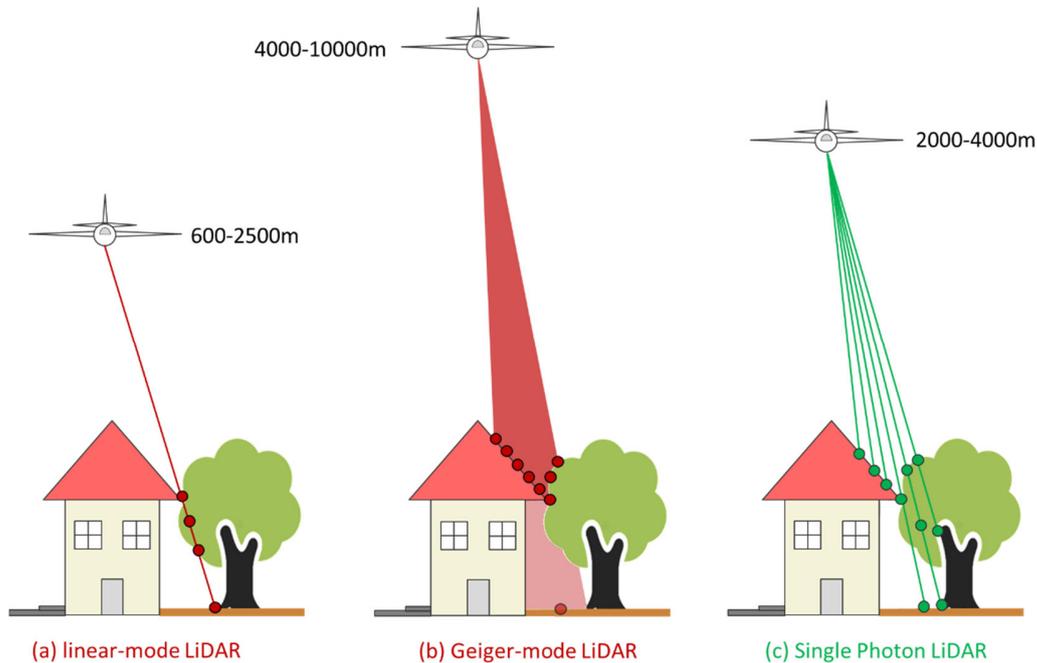


Abb. 1: Prinzipskizze eines einzelnen Laserpulses bei (a) konventionellem Laserscanning, (b) Geiger-mode LiDAR und (c) Single Photon LiDAR

Abb. 1 zeigt die Prinzipskizze eines Einzelpulses für alle drei genannten Erfassungsmethoden (konventionelles Laserscanning, GmLiDAR, SPL). In Abb. 1b ist dabei die relativ starke Strahlaufweitung beim GmLiDAR angedeutet und in Abb. 1c die Auffächerung des Einzelpulses in Teilstrahlen beim SPL visualisiert. Das Prinzip der Echodetektion bei konventionellem Laserscanning und bei SPL ist in Abb. 2 skizziert. Beim linear-mode LiDAR kann die gesamte Wellenform aufgezeichnet werden und entweder online (PFENNIGBAUER ET AL. 2014) oder im postprocessing (MALLETT & BRETAR, 2009) ausgewertet werden. Dies führt dazu, dass im skizzierten Fall auch das schwächere Ziel (2. Ast) detektiert werden kann. Beim SPL liefern die vielen Einzelzellen ein Summensignal am Ausgang des SiPM Detektors. Dies ist durch das Bündel an blauen Linien von jeder Zelle zum gemeinsamen Ausgang schematisch angedeutet. Die Detektion selbst erfolgt mittels Schwellwertverfahren. In der dargestellten Situation ist das Signal des zweiten Ziels dabei beispielsweise zu schwach, um zu einem Messpunkt zu führen.

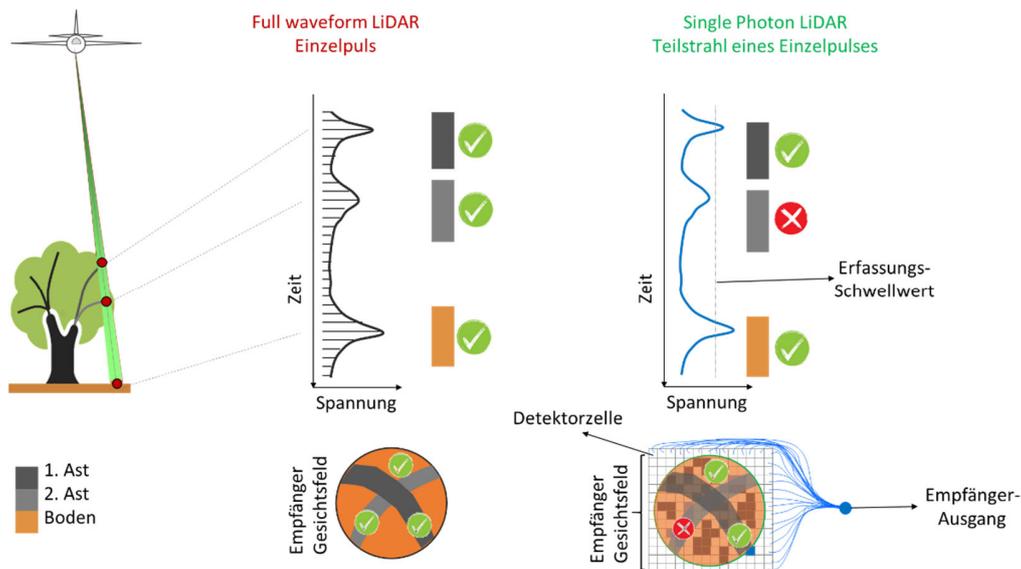


Abb. 2: Schematische Abbildung der Signalerfassung beim Full Waveform Laserscanning (links) und Single Photon LiDAR (rechts)

In der flugzeuggetragenen Laserbathymetrie kommen seit jeher wellenformbasierte Sensorsysteme zum Einsatz (GUENTHER et al. 2000). Die Interaktion der Laserstrahlung mit dem Medium Wasser ist komplex (PFEIFER et al. 2016). Aufgrund des hohen Anteils an gerichteter Reflexion ist die Anteil von der Wasseroberfläche stark richtungsabhängig. In der Wassersäule kommt es durch Volumenstreuung an Partikeln im Wasser zu einer nichtlinearen Strahlaufweitung und einer generell exponentiellen Signaldämpfung, wodurch die Stärke des vom Gewässerboden zurückgestreuten Signals mit zunehmender Wassertiefe massiv abnimmt. Optimale Ergebnisse sind daher generell mittels bathymetriespezifischer Wellenformauswertung zu erreichen (ALLOUIS et al. 2010; SCHWARZ et al. 2019). Allerdings werden heute auch Scanner für bathymetrische Zwecke genutzt, bei denen die Echodetektion auf Schwellwertverfahren basiert und die grüne Wellenlänge als Teil eines multispektralen Scanners eher für die Ableitung von Vegetationsindizes ausgelegt ist (FERNANDEZ-DIAZ et al. 2016). Darüber hinaus setzen andere dezidierte Bathymetriescanner zwar Wellenformaufzeichnung ein, werten die Signale aber online im Gerät ohne besondere Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften von Wasserzielen aus (PFENNIGBAUER et al. 2014). Aus diesem Grund ist die bei SPL eingesetzte schwellwertbasierte Echodetektion prinzipiell als bathymetrietauglich einzustufen.

Wie bereits weiter oben erwähnt, wird bei SPL der Laserstrahl in 10 x 10 stark gebündelte Teilstrahlen aufgefächert. Beim Leica SPL100 im Speziellen beträgt die nominelle Strahldivergenz laut Datenblatt 0.08 mrad (LEICA 2020). Analyse konkreter Messdaten ergab für den Divergenzwinkel zweier benachbarter Teilstrahlen etwa 0.16 mrad. Bei einer Flughöhe von 3750 m beträgt der Durchmesser des Laserfootprints am Boden daher 30 cm bei einem Abstand benachbarter Punkte von 60 cm. Für Anwendungen in der Topografie ist dieser Abstand gerade ausreichend, um zu verhindern, dass der reflektierte Laserpuls eines Teilstrahls vom benachbarten Detektor erfasst wird. Die Volumenstreuung in der Wassersäule führt aber bei zunehmender Wassertiefe zu

einer nicht-linearen Aufweitung des Laserfootprints. Entsprechende Prinzipskizzen zur Unterwasser-Strahlaufweitung sind in u.a. in GUENTHER et al. (2000; Abb. 4) und PFEIFER et al. (2016; Abb. 9) zu finden.

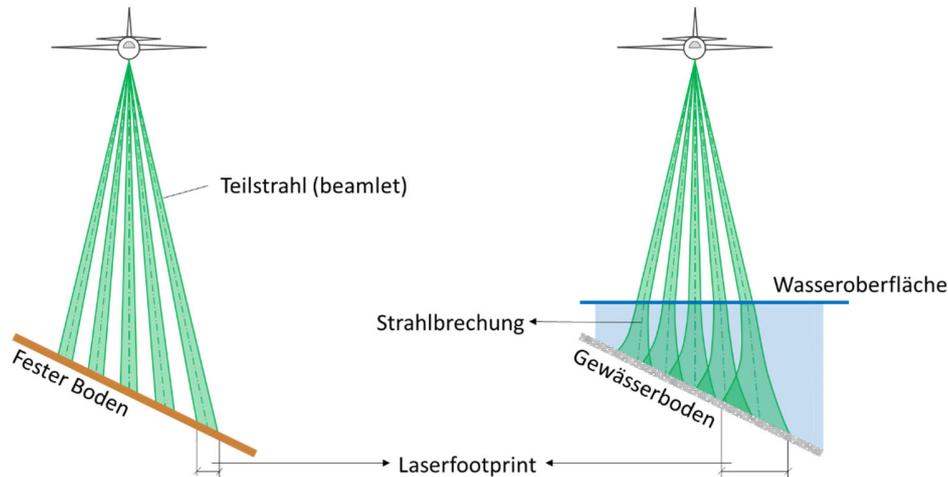


Abb. 3: Schematische Darstellung der Laserstrahlanordnung und Strahlaufweitung beim SPL100; links: Topografieerfassung mit linearer Strahlaufweitung und nicht überlappenden Footprints; rechts: Bathymetrieerfassung mit exponentieller Strahlaufweitung und überlappenden Footprints

Abb. 3 zeigt die Auswirkungen für die eng benachbarten Teilstrahlen des SPL Systems. Daraus ist zu erkennen, dass es im Gegensatz zu topografischen Zielen (links) bei bathymetrischen Anwendungen (rechts) durch die Strahlaufweitung zu einer Überlappung der Laserfootprints kommt. Dadurch kann aber auch das vom Gewässerboden reflektierte Signal eines Teilstrahls zu benachbarten Detektoren gelangen und dort ggf. ein Echo auslösen. Wegen der Divergenz der einzelnen Teilstrahlen (Fächer) kommt es dadurch zu einer Verfälschung der Entfernungsmessung und damit zu potenziell systematischen Fehlern in der Unterwasserpunktwolke. Der Effekt ist bei horizontalem Gewässergrund eher gering, da der gesamte Öffnungskegel des Strahlenbündels lediglich etwa 1.5 mrad beträgt. Bei großer Neigung kann die fehlerbehaftete Entfernungsmessung aber Höhenfehler im dm- bis m-Bereich verursachen. Entsprechende Beobachtungen wurden bereits an Traufenlinien von Hausdächern gemacht (MANDLBURGER et al. 2019), sind aber bei Unterwasserzielen bei den durch Volumenstreuung effektiv überlappenden Laserfootprints wesentlich wahrscheinlicher.

In Abb. 3 ist neben der Strahlaufweitung im Wasser auch die Strahlbrechung an der Wasseroberfläche angedeutet. Voraussetzung für die Refraktionskorrektur ist daher die Kenntnis der Wasseroberfläche. MANDLBURGER & JUTZI (2019) haben die Eignung von SPL zur Erfassung der Wasseroberfläche untersucht und kamen zum Schluss, dass bei typischen Flughöhen (ca. 4000 m) und Strahlneigungen (15°) nur wenige Photonen von der Wasseroberfläche beim Empfänger ankommen. Die Bestimmung der Wasseroberfläche ist daher unsicher und erfordert räumliche Aggregation und die Anwendung von statistischen Methoden für die Festlegung der lokalen Wasserspiegellage. Die mangelnde Wellenformaufzeichnung, die potenzielle Pulsüberlappung und die unsichere Wasseroberflächenbestimmung stellen somit die Einschränkungen für die SPL-basierte Bathymetrieableitung dar.

3 Untersuchungsgebiete

Im Auftrag der Stadt Wien (Magistratsabteilung 41, Stadtvermessung) erfolgte Ende Juli 2018 im Rahmen eines Pilotprojektes die Erfassung von etwa 30% des Wiener Stadtgebietes (MANDLBURGER et al. 2019). Der Flugblock (20 km x 8 km) besteht aus 10 Streifen mit 50%iger Überlappung. Die Befliegung erfolgte aus ca. 3800 m Flughöhe mit einem Öffnungswinkel des Scankegels von 15°, woraus sich eine Streifenbreite von 2000 m ergibt. Das Befliegungsgebiet reicht von der Lobau im Osten über den Bereich der Wiener Innenstadt bis in den westlich angrenzenden Wiener Wald. Dabei wurden auch zahlreiche Gewässerflächen (Donau, Neue Donau, Alte Donau, Heustadlwasser, etc.) aufgenommen. In derselben Mission wurden auch zwei Flugstreifen in Niederösterreich entlang der Pielach, einem voralpinen Schotterfluss in Niederösterreich (MANDLBURGER et al. 2015) erfasst. Die Untersuchungsgebiete sind in Abb. 4 dargestellt.

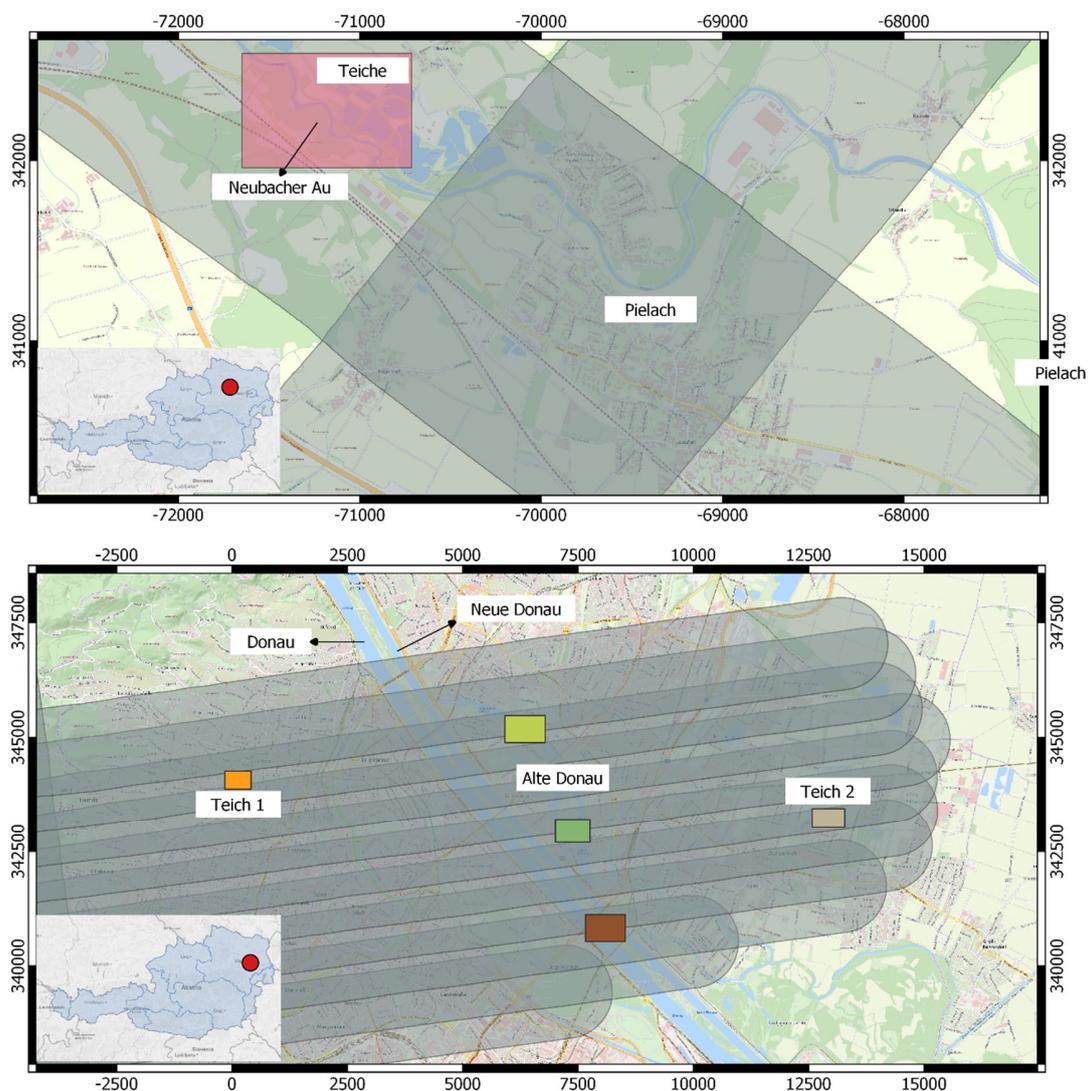


Abb. 4: Untersuchungsgebiet Wien (oben) und Niederösterreich, Pielach (unten), Übersichtskarte: basemap.at, Koordinatenbezugssystem: MGI, Gauß-Krüger M34 (EPSG: 31256)

4 Ergebnisse und Diskussion

In Abb. 5 (Wien) und Abb. 6 (Niederösterreich) sind ausgewählte Profilschnitte aus der SPL100 Punktwolke abgebildet. In allen Fällen beträgt die Profilbreite 3 m und die Punkte sind nach Signalamplitude eingefärbt, wobei rot für hohe und blau für niedrige Amplitude steht. Die Punktwolken sind nicht refraktionskorrigiert, und daher sind die scheinbaren Gewässersohlpunkte tendenziell zu tief.

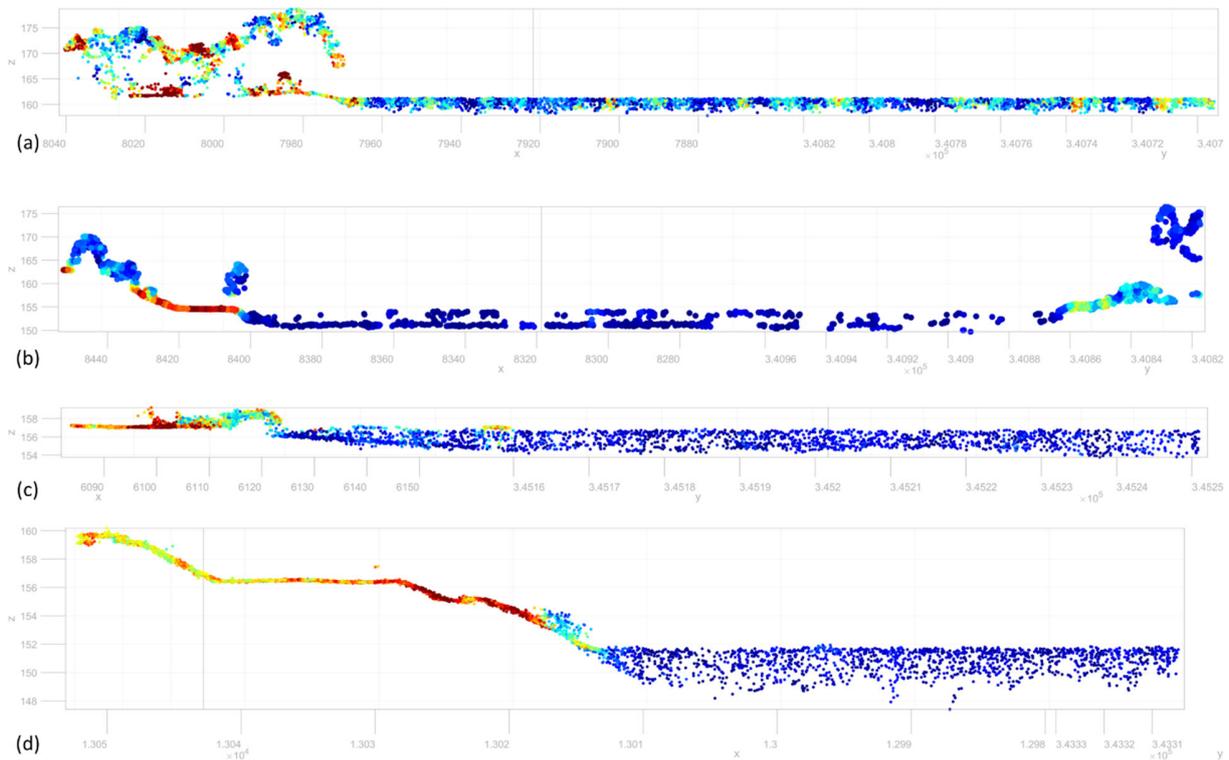


Abb. 5: Untersuchungsgebiet Wien, Profilschnitte durch SPL100 3D-Punktwolke eingefärbt nach Signalamplitude (rot: hoch, blau: niedrig) (a) Donau, (b) Neue Donau, (c) Alte Donau, (d) Teich 2

Abb. 5a zeigt einen Ausschnitt der Donau, die eine verhältnismäßig große Trübe aufweist. Die Erfassung von Gewässertiefen mittels Laserbathymetrie ist generell bei Flüssen dieser Größe auch für darauf spezialisierte Sensoren problematisch und nur im unmittelbaren Uferbereich möglich. Die SPL Punktwolke zeigt hier ein etwa 2 m breites Band an Punkten, wobei Sohlpunkte nur bis zu einer Tiefe von ca. 1 m reichen, bevor der Gewässerboden im Rauschen verschwindet. Die Wasseroberfläche hingegen bildet sich relativ klar ab. Durch Rückstreuung an Sedimentpartikeln gelangt ausreichend Signal von knapp unterhalb der Wasseroberfläche zum Sensor, sodass die Oberfläche flächendeckend abgebildet ist. In Abb. 5b von der Neuen Donau, einem parallel zum Donaustrom verlaufenden stehenden Gewässer mit relativ klarerem Wasser, sind Echos von der Wasseroberfläche nur sporadisch zu beobachten. Im Gegensatz dazu ist aber der Gewässerboden bis zu einer Tiefe von ca. 2.5 m deutlich abgebildet. Dies unterstreicht die prinzipielle Eignung

des Sensors für die Kartierung von Unterwasser Topografie, zeigt aber andererseits auch die Grenzen, da für präzise Bathymetrieerfassung sowohl Echos vom Gewässerboden als auch verlässliche Information von der Wasseroberfläche erforderlich sind.

Abb. 5c und d schließlich zeigen zwei weitere Beispiele von stehenden Gewässern (c: Alte Donau, d: künstlicher Teich). Beide Punktwolken weisen eine gute Abdeckung mit Punkten nahe der Wasseroberfläche und eine maximale Tiefe der klar erkennbaren Gewässerbodenpunkte von ca. 1.8 m auf. An der Alten Donau wurde etwa zum Zeitpunkt der Befliegung eine Secchi Tiefe von 1.6 m gemessen. Die maximale Eindringtiefe des Sensors entspricht in diesem Bereich daher der einfachen Secchi Tiefe.

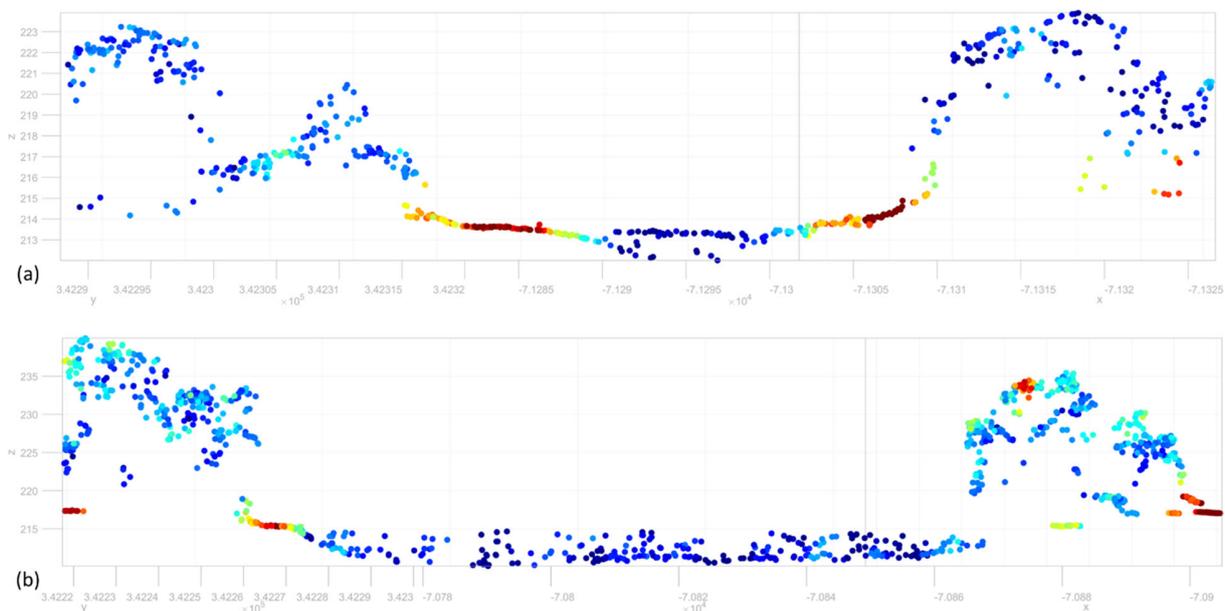


Abb. 6: Untersuchungsgebiet Niederösterreich/Pielach, Profilschnitte durch SPL100 3D-Punktwolke eingefärbt nach Signalamplitude (rot: hoch, blau: niedrig) (a) Pielach, (b) Schotterteich

In Abb. 6 sind zwei Beispiele aus dem Untersuchungsgebiet Niederösterreich/Pielach abgebildet. Abb. 6a zeigt einen Profilschnitt durch den Pielach Fluss. Die Wasseroberfläche ist in der Punktwolke klar erkennbar, die Gewässerbodenpunkte hingegen weisen in der Mitte des etwa 20 m breiten Flusses eine Lücke auf. Die Eindringtiefe beträgt etwa 1.2 m. Interessant ist in diesem Zusammenhang der flach überströmte Uferbereich. Der Flussschotter im trockenen Bereich reflektiert sehr gut (rote Punkte mit hoher Signalamplitude). In Richtung Flussmitte sind dann Punkte am Gewässerboden mit etwas geringerer Amplitude (gelb, grün) zu erkennen, zu denen es keine korrespondierenden Punkte der Wasseroberfläche gibt. Das ist ein Indiz dafür, dass die Signalantwort von der Wasseroberfläche zu schwach für flächendeckende Echodetektion ist, während die Punkte am Gewässerboden bereits durch die Dämpfung in der Wassersäule eine zunehmend geringere Signalamplitude aufweisen. Erst bei größerer Tiefe gegen die Flussmitte hin sind sowohl Oberflächenpunkte als auch Bodenpunkte zu erkennen. Prinzipiell ist dieses Verhalten auch bereits bei dezidierten topo-bathymetrischen Laserscannern mit online prozessierten Wellenformen beobachtet worden (MANDLBURGER et al. 2015).

Abb. 6b zeigt einen Profilschnitt durch einen Schotterteich mit geringer Trübung. Bodenpunkte können in diesem Fall bis zu einer Tiefe von etwa 3.6 m erkannt werden, allerdings ist auch hier lediglich der Uferbereich dicht mit Gewässerbodenpunkten besetzt und die Wasseroberfläche weist nur sporadische Echos auf, sodass deren Modellierung nur unsicher möglich ist. Für stehende Gewässer ist durch den Einsatz von statistischen Methoden und räumlicher Aggregation eine Schätzung der Wasserspiegellage in dm-Genauigkeit möglich (MANDLBURGER & JUTZI 2019). Für fließgewässer mit geneigten Wasseroberflächen sowie für Küstengewässer bei entsprechendem Wellengang hingegen führt räumliche Aggregation zu lokalen Punktlagefehlern der Gewässerbodenpunkte infolge des fehlenden Detailreichtums der Oberflächenbeschreibung.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden die Möglichkeiten und Grenzen der Bathymetrieerfassung mittels Single Photon LiDAR aus Sicht der Theorie und anhand von konkreten Messergebnissen diskutiert. Prinzipiell kann festgehalten werden, dass Single Photon LiDAR bathymetrische Fähigkeiten aufweist, die sich aufgrund folgender Eigenschaften ergeben: (i) Verwendung von wasserdurchdringender grüner Laserstrahlung ($\lambda=532$ nm), (ii) Verwendung eines konischen Scanmechanismus mit konstanter Neigung gegenüber der Nadirrichtung von $10-20^\circ$, dem allgemein anerkannten Optimum für bathymetrische Anwendungen, und (iii) Einsatz eines mehrzielfähigen Detektors für jeden einzelnen Teilstrahl bestehend aus einem Array von Einzelphoton-sensitiven Zellen. Als einschränkende Parameter sind zu nennen: (i) technologisch bedingte, mangelnde Aufzeichnung der vollen Wellenform, (ii) damit verbunden keine Möglichkeit der gewässerspezifischen Wellenformanalyse und (iii) potenzielles Empfangen des durch Volumenstreuung im Wasser breiter rückgestreuten Signals von benachbarten Teilstrahlen.

Die Analyse der 3D-Punktwolken einer konkreten Messkampagne in Wien (Donau, Neue Donau, Alte Donau, künstliche Teiche) und Niederösterreich (Pielach Fluss, Schotterteiche) hat ergeben, dass die zu erwartende Eindringtiefe etwa im Bereich der 1-fachen Secchi Tiefe liegt und die Erfassung der Wasseroberfläche stark von der Trübung des Gewässers beeinflusst zu sein scheint. Mit dem vorliegenden Datenmaterial konnte keine Gegenüberstellung der Genauigkeiten und tatsächlich erzielbaren Messtiefen angestellt werden. Dies wird Gegenstand künftiger Untersuchungen sein. Es kann aber abschließend festgestellt werden, dass der SPL100 Sensor neben seiner intendierten Verwendung als Laserscanner für großflächige Topografieerfassung auch als Nebenprodukt Tiefen von seichten und klaren Gewässern liefert. Genauigkeit und Eindringtiefe sind allerdings gegenüber dezidierten Bathymetriescannern eingeschränkt.

6 Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde durch Mittel der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) im Rahmen des Forschungsprojektes „Bathymetrieermessung durch Fusion von Flugzeuglaserscanning und multispektralen Luftbildern“ unterstützt. Der Autor dankt der Stadt Wien, Magistratsabteilung 41 (Stadtvermessung Wien) für die Bereitstellung der SPL Punktwolken.

7 Literaturverzeichnis

- AGISHEV, R., COMERÓN, A., BACH, J., RODRIGUEZ, A., SICARD, M., RIU, J. & ROYO, S., 2013: Lidar with SiPM: Some capabilities and limitations in real environment. *Optics and Laser Technology*, **49**, 86-90.
- ALLOUIS, T., BAILLY, J.-S., PASTOL, Y. & ROUX, C. L., 2010: Comparison of LiDAR waveform processing methods for very shallow water bathymetry using raman, near-infrared and green signals. *Earth Surface Processes and Landforms* **35**(6), 640-650.
- CLIFTON, W., STEELE, B., NELSON, G., TRUSCOTT, A., ITZLER, M. & ENTWISTLE, M., 2015: Medium altitude airborne geiger-mode mapping LIDAR system. *Proc. SPIE*, **9465**.
- DEGNAN, J., 2002: Photon-counting multikilohertz microlaser altimeters for airborne and spaceborne topographic measurements. *Journal of Geodynamics* **34**(3-4), 503-549.
- DEGNAN, J., 2016: Scanning, Multibeam, Single Photon Lidars for Rapid, Large Scale, High Resolution, Topographic and Bathymetric Mapping. *Remote Sensing* **8**(11), 923-958.
- DEGNAN, J., 2018: Airborne And Spaceborne Single Photon 3D Imaging Lidars. In *Proceedings of 21st International Workshop on Laser Ranging*, Canberra, Australia.
- FERNANDEZ-DIAZ, J., CARTER, W., GLENNIE, C., SHRESTHA, R., PAN, Z., EKHTARI, N., SINGHANIA, A., HAUSER, D. & SARTORI, M., 2016: Capability Assessment and Performance Metrics for the Titan Multispectral Mapping Lidar. *Remote Sensing* **8**(936), 1-34.
- GUENTHER, G. C., CUNNINGHAM, A. G., LAROQUE, P. E. & REID, D. J., 2000: Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry. *20th EARSeL Symposium: Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea*, Dresden.
- KIM, S., LEE, I. & KWON, Y. J., 2013: Simulation of a geiger-mode imaging LADAR system for performance assessment. *Sensors* **13**(7), 8461–8489.
- LEICA, 2020: Produktbeschreibung des Leica SPL100 LiDAR Sensors, <https://leica-geosystems.com/de-at/products/airborne-systems/topographic-lidar-sensors/leica-spl100>
- MALLET C. & BRETAR, F., 2009: Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **64**(1), 1-16.
- MANDLBURGER, G., LEHNER, H. & PFEIFER, N., 2019: A Comparison of Single Photon and Full Waveform LiDAR. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **IV-2/W5**, 397-404.
- MANDLBURGER, G. & JUTZI, B., 2019: On the Feasibility of Water Surface Mapping with Single Photon LiDAR. *ISPRS International Journal of Geo-Information* **8**(188), 1-23.
- PFENNIGBAUER, M., WOLF, C., WEINKOPF, J. & ULLRICH, A., 2014: Online waveform processing for demanding target situations. In *Proc. SPIE*, **90800J**.
- PFEIFER, N., MANDLBURGER, G. & GLIRA, P., 2016: Laserscanning. *Handbuch der Geodäsie: Photogrammetrie und Fernerkundung*, C. Heipke (Hrsg.), Springer, Berlin Heidelberg, 431-481.
- ROMANO, M., 2015: Geiger Mode LiDAR. *Proceedings of the ASPRS IGTF Conference*, ISBN: 9781510804579.
- 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.
- STOKER, J. M., ABDULLAH, Q. A., NAYEGANDHI, A. & WINEHOUSE, J., 2016: Evaluation of Single

Photon and Geiger Mode Lidar for the 3D Elevation Program. *Remote Sensing* **8(9)**, 716-767.

ULLRICH, A. & PFENNIGBAUER, M., 2016: Linear LIDAR versus Geiger-mode LIDAR: impact on data properties and data quality. In *Proc. SPIE* **9832**, 983204-983217.