



Gewässervermessung mittels aktiver und passiver optischer Fernerkundung

Mapping bathymetry via active and passive remote sensing

Gottfried Mandlbauer, Stuttgart

Kurzfassung

Die präzise Erfassung von Gewässertiefen (Bathymetrie) ist von großer sozioökonomischer und ökologischer Bedeutung. Zu den Anwendungsfeldern zählen u.a. Schifffahrt, Wasserwirtschaft, Gewässerökologie, Hydrobiologie, Naturgefahrenmanagement, etc. Während die Erfassung von tiefen und trüben Gewässern (heimische Alpenseen, schiffbaren Flüsse) in der Regel mittels Echolot erfolgt, sind aktive und passive optische Fernerkundungsmethoden zur effizienten und großflächigen Vermessung von klaren seichten Gewässern wie z. B. Alpenflüssen, Uferzonen von stehenden und fließenden Gewässern und Klarwasser-Küstenbereichen geeignet. Dabei kommen folgende flugzeuggetragene Methoden zum Einsatz: (i) Tiefenbestimmung durch Analyse der Radiometrie multispektraler Bilder (ii) Mehrmedienphotogrammetrie und (iii) Laserbathymetrie. Dabei nutzen die bildbasierten passiven Ansätze die Reflexionen der Sonnenstrahlung vom Gewässerboden zur Tiefenbestimmung. Die Laserbathymetrie hingegen ist ein aktives Verfahren basierend auf der Laufzeitmessung von kurzen grünen Laserpulsen. In diesem Beitrag werden die Grundlagen dieser drei Ansätze beschrieben, die jeweiligen Vor- und Nachteile diskutiert, aktuelle Forschungsarbeiten zur integrierten Auswertung vorgestellt, und die Einsatzmöglichkeiten anhand konkreter Datensätze (Stubaier Alpen, Augsburg) aufgezeigt.

Schlüsselwörter: Laserbathymetrie, Mehrmedienphotogrammetrie, Multispektrale Tiefenbestimmung, Gewässervermessung, Hydrographie

Abstract

Precise mapping of water depths (bathymetry) is of high socio-economic and ecologic importance. Among the potential fields of application are navigation, water resources management, water ecology, hydrobiology, natural hazard management, etc. While echo sounding is the prime technique for charting deep and turbid waters (alpine lakes, navigable rivers), active and passive optical remote sensing is well suited for efficient area-wide capturing of clear and shallow water bodies (alpine rivers, littoral area of standing and running waters, clear coastal water areas, etc.). The following airborne techniques are employed: (i) spectrally based depth estimation exploiting the radiometry of multi-spectral images, (ii) multimedia photogrammetry based on stereo images, and (iii) airborne laser bathymetry. Whereas the prior two are passive techniques using the reflections of solar illumination, the latter is an active method based on runtime measurement of short green laser pulses. In this contribution the principles of the aforementioned techniques as well as their advantages and shortcomings are described, current research activities concerning integrated data processing are discussed, and the fields of application for bathymetry from optical remote sensing are illustrated with real world examples.

Keywords: airborne laser bathymetry, multimedia photogrammetry, spectrally based depth estimation, water capturing, hydrography

1. Einleitung

Die regelmäßige Erfassung des quantitativen und qualitativen Zustands von Küsten- und Binnengewässern gewinnt, nicht zuletzt vor dem Hintergrund des Klimawandels, zunehmend an Bedeutung. Der quantitative Aspekt bezieht sich dabei nicht ausschließlich auf die Erfassung von Gewässertiefen allein, wie sie etwa für die Einhaltung von Mindesttiefen der Fahrrinnen in der Schifffahrt erforderlich sind, sondern generell auf die Beschreibung der Unterwassertopographie und deren Veränderung. In diesem erweiterten

Sinn ist die Bathymetrie (griechisch: βάθος (*bathus*), „tief“, und μέτρον (*metron*), „messen“) Grundlage für eine Vielzahl sozioökonomischer und ökologischer Fragestellungen. Zu ersteren zählen etwa Hochwasserrisikoabschätzung, Gefahrenzonen- und Schutzmaßnahmenplanung, und zu letzteren Renaturierung, Monitoring von Veränderungen (fluviale Morphodynamik) und deren Auswirkungen auf aquatische Habitate (Hydrobiologie, Habitatmodellierung, etc.).

Das Thema Wasser ist in der Europäischen Union (EU) durch drei Richtlinien vertreten, die

Wasserrahmenrichtlinie (EU, 2000; Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT), 2018a), (ii) die Hochwasserrichtlinie (EU, 2007; BMNT, 2018b) und die Fauna-Flora-Habitat Richtlinie (EU, 1992; Umweltbundesamt (UBA), 2018). Alle drei schreiben eine regelmäßige Zustandserfassung, etwa im 6-Jahres-Zyklus, vor. Die wiederholte Erfassung von Flüssen und stehenden Binnengewässern ist dabei ein essenzieller Teil zur Erfüllung der oben genannten Richtlinien, was den Einsatz effizienter bathymetrischer Techniken erfordert. Dasselbe gilt auch für Küstengebiete mit Anwendungen im Bereich des Küstenschutzes (Christiansen, 2016) sowie die Überwachung benthischer Habitate (Parrish et al., 2016; Brown et al., 2011).

Für die Vermessung tiefer und trüber Gewässer ist nach wie vor die Echolot-Methode die erste Wahl, da Schall eine vergleichsweise geringe Dämpfung in der Wassersäule erfährt als Licht (Heine et al., 2016a; Heine et al., 2016b). Für die flächige Erfassung seichter Gewässer ist schiffsbasierte Sonarvermessung allerdings ineffizient, da der Abtastbereich unter dem Schwingkopf von der Wassertiefe abhängt (vgl. Abbildung 1). Außerdem ist der Einsatz auf schiffbare Bereiche eingeschränkt und der unmittelbare Uferbereich daher verfahrensbedingt nicht erfassbar. Als effiziente Alternative für relativ seichte und klare Gewässer bieten sich flugzeuggetragene, op-

tische Fernerkundungsmethoden an. Zwar ist die Absorption elektromagnetischer Strahlung im optischen Bereich (sichtbares Licht und nahes Infrarot) in der Wassersäule vergleichsweise stark und die erfassbare Gewässertiefe abhängig von der Gewässertrübung eingeschränkt (max. 50 - 60 m bei sehr klaren Küstengewässern und guter Reflektivität des Untergrunds), dafür hängt der erfassbare Bereich lediglich von der Flughöhe über Grund und nicht von der Wassertiefe ab, was eine effiziente, flächenhafte Aufnahme seichter Gewässer ermöglicht. Abbildung 1 veranschaulicht die Zusammenhänge.

Für die Bathymetrievermessung mittels optischer Fernerkundung haben sich folgende Verfahren etabliert: (i) Ableitung von Gewässertiefen basierend auf dem radiometrischen Inhalt multispektraler Bilder, (ii) Mehrmedienphotogrammetrie auf Basis von Stereo-Luftbildern und (iii) Laserbathymetrie (engl. Airborne Laser Bathymetry, ALB). Während die ersten beiden Methoden passiv sind und die vom Gewässerboden rückgestreute Sonnenstrahlung für die Tiefenmessung ausnützen, ist ALB ein aktives Verfahren, welches auf Laufzeitmessung eines gepulsten, grünen Lasers basiert. Während in der Vergangenheit die genannten Erfassungsmethoden mehrheitlich getrennt von einander zum Einsatz kamen, geht die Sensorentwicklung derzeit eindeutig in die Richtung hybrider Systeme mit Kameras und Laser-

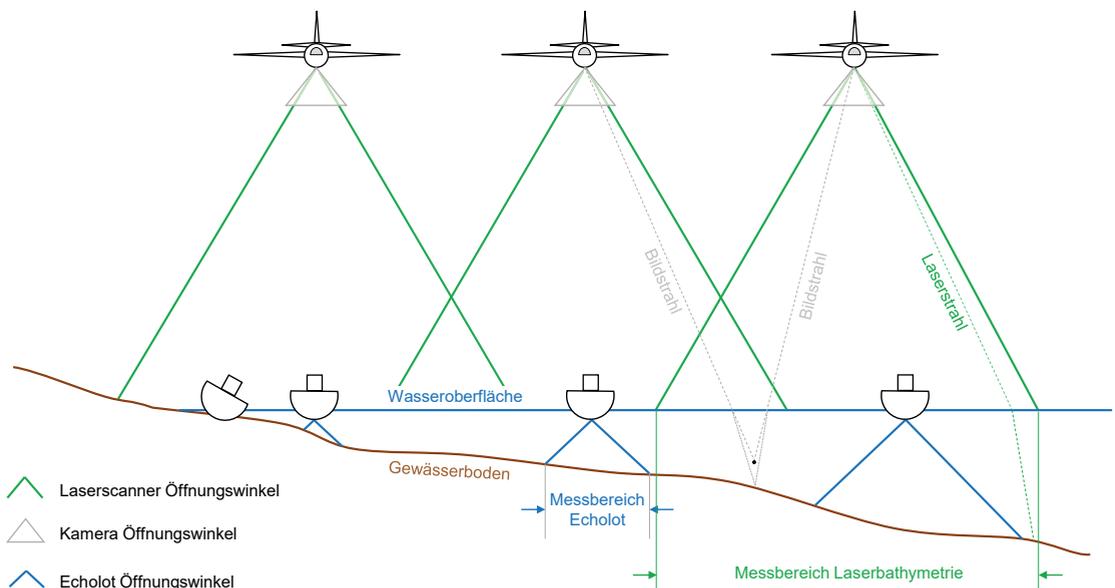


Abb. 1: Prinzipische Skizze – Erfassungsbereiche bei schiffsbasierter Hydrographie und Flugzeugfernerkundung

scannern auf derselben Plattform (Mandlbürger, 2018b). Laufende Forschungsarbeiten des Autors im Rahmen des DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) Projektes „Bathymetrieermessung durch Fusion von Flugzeuglaserscanning und multispektralen Luftbildern“ fokussieren sich daher auf die gemeinsame Auswertung von bild- und scanbasierten Tiefenmessverfahren mit dem Ziel der lückenlosen Erfassung von Flachwasserbereichen und einer verbesserten Klassifizierung des Gewässeruntergrunds (Boden, Vegetation, Hindernisse).

In diesem Beitrag werden daher zunächst in Abschnitt 2 die Grundlagen Bathymetrieerfassung mittels optischer Fernerkundung und in Abschnitt 3 die gegenwärtigen Forschungsarbeiten im Rahmen des obengenannten DFG Forschungsprojektes beschrieben. Anhand konkreter Datensätze (Blaue Lacke, Stubaiäer Alpen; Autobahnsee, Augsburg) wird in Abschnitt 4 die Effizienz und Genauigkeit der optischen Bathymetriebestimmung beispielhaft demonstriert und die Vor- und Nachteile im anschließenden Abschnitt 5 diskutiert. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse (Abschnitt 6).

2. Stand der Technik

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der unterschiedlichen Methoden zur Bathymetrieermessung mittels optischer Fernerkundung vorgestellt.

1.1 Gewässertiefe aus der Radiometrie multispektraler Bilder

Die Grundidee der Tiefenbestimmung aus radiometrischer Bildinformation ist es, einen Zusammenhang zwischen dem radiometrischen Bildinhalt und der Gewässertiefe herzustellen (Lyzenga, 1978). Voraussetzung dafür ist das Verständnis der komplexen Interaktion der Sonnenstrahlung mit der Atmosphäre, der Wasseroberfläche, dem Wasserkörper und schließlich dem Gewässerboden als eine Funktion der Wellenlänge λ . Die Stärke der am Sensor (Kamera) ankommende Strahlung kann dabei als Summe der einzelnen Teilbeiträge angeschrieben werden (Legleiter et al., 2009).

$$L_T(\lambda) = L_b(\lambda) + L_c(\lambda) + L_s(\lambda) + L_p(\lambda) \quad (1)$$

Die am Sensor einfallende Gesamtstrahlung L_T setzt sich demnach aus der vom Gewässerboden reflektierten Strahlung L_b , der aus dem Wasser-

körper rückgestreuten Strahlung L_c , dem Signalanteil von der Reflexion an der Wasseroberfläche L_s und den Anteilen aus der Rückstreuung an Partikeln in der Atmosphäre L_p zusammen. In Abbildung 2 sind die Zusammenhänge schematisch dargestellt. Die Signalabschwächung innerhalb der Wassersäule ist exponentiell als Folge von kontinuierlicher vorwärts- und rückwärtsgerichteter Streuung sowie Signalabsorption im Medium Wasser. Der vom Boden kommende Signalanteil L_b hängt sowohl von der Wassertiefe als auch von der Bodenbeschaffenheit (Reflektivität, Rauigkeit) ab, und der aus der Wassersäule stammende Beitrag ist bestimmt durch die optischen Eigenschaften des Wassers (Trübheit). Je nach Blickrichtung, kann der Term L_s infolge spiegelnder Reflexion an der Wasseroberfläche einen großen Anteil am Gesamtsignal L_T ausmachen. Solche Glanzlichter entstehen dann, wenn es zu einem direkten Einfall des an der Wasseroberfläche gerichtet reflektierten Sonnenlichtes an einem Sensorpixel kommt. Je nach Bewegtheit der Wasseroberfläche (Wellen) treten Glanzlichtpixel entweder sporadisch oder gehäuft auf. In jedem Fall müssen die entsprechenden Bildbereiche im Rahmen der Datenvorverarbeitung maskiert und für die weitere Verarbeitung deaktiviert werden.

Für Bilder, die optisch tiefes Wasser enthalten, lässt sich ein einfacher physikalischer Zusammenhang zwischen Wassertiefe und Rückstreustärke formulieren (Lyzenga et al., 2006):

$$L(h) = L_s + L_B e^{-ah} \quad (2)$$

$L(h)$ ist dabei die am Sensor empfangene Strahlung nach der Korrektur von Atmosphäre und etwaigen Glanzlichtern. Der Term L_s beinhaltet in diesem Fall sowohl die Beiträge der Reflexion

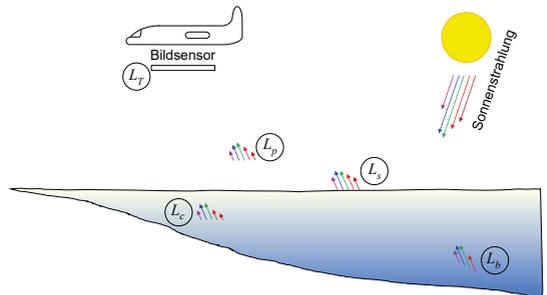


Abb. 2: Prinzipskizze – Zusammensetzung der am Bildsensor auftreffenden Strahlung aus Teilkomponenten von der Atmosphäre, der Wasseroberfläche, dem Wasserkörper und –boden

von der Wasseroberfläche als auch die Rückstreuung von einer (unendlich) tiefen Wassersäule.

L_B beschreibt in erster Linie die Reflektivität des Bodens, beinhaltet aber auch Transmissionsverluste beim Durchgang durch die Luft-Wasser-Grenzschicht und Effekte der Volumenstreuung im Wasserkörper. Der Exponentialkoeffizient α ist der effektive Dämpfungskoeffizient und besteht aus der Summe von vor- und rückwärtsgestreuten Lichtanteilen. Aus Gleichung 2 ist der bereits oben angesprochene exponentielle Signalabfall in Abhängigkeit der Wassertiefe h und der optischen Eigenschaften des Wasserkörpers (α) ersichtlich. Durch Entlogarithmieren kann damit ein linearer Zusammenhang zwischen der Wassertiefe und dem radiometrischen Bildinhalt hergestellt und durch einfache Umformung die Wassertiefe h direkt berechnet werden.

$$h = \frac{1}{\alpha} \ln \left[-\frac{L_B}{L(h) - L_S} \right] \quad (3)$$

Vorausgesetzt, dass sowohl die Wasserbedingungen als auch der Untergrund homogen sind, kann somit bereits aus einem spektralen Bildkanal ohne Vorhandensein von externen Referenzdaten die Tiefe ermittelt werden. Da allerdings sowohl die Signalabsorption in der Wassersäule als auch die Bodenreflektivität von der Wellenlänge abhängen, werden in der Praxis alle verfügbaren multispektralen Bildkanäle herangezogen, um die in Gleichung 3 verbleibenden Unbekannten zu bestimmen. Dies geschieht in der Regel im Rahmen einer Optimierungsaufgabe auf Basis von Referenzdaten aus terrestrischer oder Echolot-Vermessung (Lyzenga et al., 2006).

Während die Gleichungen 2 und 3 ein physikalisch motiviertes Modell darstellen, besteht hier u.a. der Nachteil, dass dabei das Vorhandensein optisch tiefer Bereiche vorausgesetzt wird. Für einige Anwendungsszenarien, wie etwa klare und mäßig tiefe Alpenflüsse, ist dies allerdings nicht notwendigerweise der Fall. Aufbauend auf der fundamentalen Erkenntnis der exponentiellen Signaldämpfung in der Wassersäule hat u. a. Legleiter (2016) das obige Modell für die Kartierung von klaren Fließgewässern weiterentwickelt, wobei der Zusammenhang zwischen Bildradiometrie und Tiefe durch Regression basierend auf Referenzpunkten (in-situ Vermessung) oder hydraulischen Parametern (Durchfluss, Bemessungskurven, etc.) hergestellt wird. Um den Fehlereinfluss der Variabilität der Bodenreflektivität auf die Tiefen-

bestimmung zu minimieren, kommen bevorzugt Logarithmen von Bandverhältnissen zum Einsatz (Legleiter et al., 2009):

$$X = \ln \left[\frac{R_B(\lambda_1)}{R_B(\lambda_2)} \right] \quad (4)$$

R_B bezeichnet darin die Strahlung vom Gewässerboden in der jeweiligen Wellenlänge λ_i . Durch Vergleich mit den Referenzdaten wird dann die optimale Bandkombination als diejenige mit dem größten Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression ausgewählt.

Die radiometriebasierte Tiefenbestimmung kommt sowohl bei Küstengebieten (Stumpf et al., 2003; Lyzenga et al., 2006) als auch bei Binnengewässern (Legleiter et al., 2009; Legleiter, 2016) zur Anwendung. Die berichteten Genauigkeiten reichen von 25 cm (Legleiter, 2016) für Flüsse mit klarem Wasser bis zu >1 m (Lyzenga et al., 2006) für Küstengewässer.

1.2 Mehrmedienphotogrammetrie

Ein komplementäres bildbasiertes Verfahren zur Tiefenbestimmung stellt die Mehrmedienphotogrammetrie dar. Dabei handelt es sich um ein rein geometrisches Verfahren, dessen Grundlagen auf Rinner (1948) zurückgehen. Mit dem Aufkommen digitaler Bilder und automatisierter Auswerteverfahren aus dem Bereich der Computer Vision (Structure from Motion, SfM), hat auch das Thema der photogrammetrischen Tiefenbestimmung wieder eine vermehrte Aufmerksamkeit erfahren. In der modernen Literatur wird die stereobildbasierte Erfassung der Unterwassertopographie für Fließgewässer (Westerway et al, 2005; Dietrich, 2016; Wimmer, 2016) und für Küstenbereiche auf Basis von Stereo-Satellitenbildern (Hodul et al) erörtert. Maas (2015) beschreibt ein rigoroses Korrekturmodell für den Mehrmedienfall und untersucht das Genauigkeitspotenzial der Methode. Er kommt dabei zum Schluss, dass gegenüber dem konventionellen photogrammetrischen Fall mit einer Verschlechterung der Ergebnisse um einen Faktor zwei gerechnet werden muss.

Aufbauend auf dem Grundkonzept der Photogrammetrie kann Unterwassertopographie aus Stereoluftbildern abgeleitet werden, sofern die innere und äußere Orientierung der Bilder bekannt ist (Mulsow, 2016) und die Wasseroberfläche mit genügender Genauigkeit rekonstruiert werden kann. Kann ein homologer Punkt des Gewässerbodens in mindestens zwei Aufnahmen identifiziert werden, muss der scheinbare Schnitt

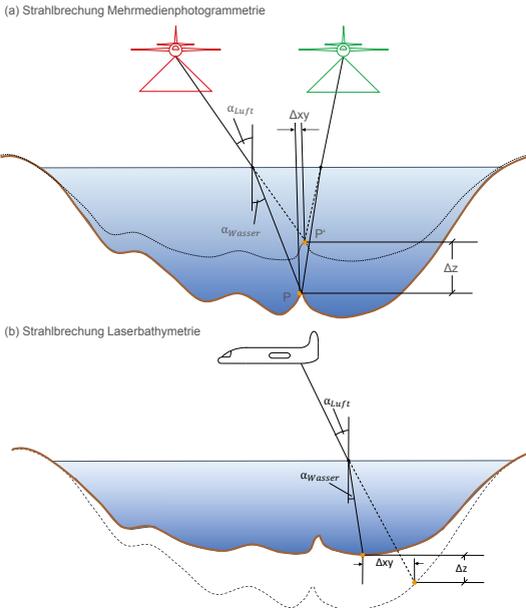


Abb. 3: Prinzipskizze – Strahlbrechung an der Wasseroberfläche für Stereophotogrammetrie und Laserbathymetrie gemäß dem Snellius’schen Brechungsgesetz

der korrespondierenden Bildstrahlen noch wegen der Brechnung an der Wasseroberfläche korrigiert werden. Die Grundlage dafür ist das Snellius’sche Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin \alpha_L}{\sin \alpha_W} = \frac{n_W}{n_L} = \frac{v_L}{v_W} \quad (5)$$

Demnach sind die Sinus der luft- und wasserseitigen Bildstrahlen (α_L und α_W) umgekehrt proportional zu den jeweiligen Brechungsindizes in Wasser ($n_W \approx 1.33$) und Luft ($n_L \approx 1.00$) und direkt proportional zu den Ausbreitungsgeschwindigkeiten ($v_L, v_W \approx 225564 \text{ km/h}$). Die in Abbildung 3a schematisch dargestellten Verhältnisse zeigen die Brechung der Bildstrahlen zum Lot hin beim Übergang vom optisch dünneren Medium Luft ins optisch dichtere Medium Wasser. Dadurch ist der scheinbare Bildpunkt P' , der sich aus dem geradlinigen Schnitt der Bildstrahlen ergibt, tendenziell zu hoch und muss durch Anbringungen der Brechung zum tatsächlichen Punkt P am Gewässergrund nach unten korrigiert werden. Detaillierte Beschreibungen der Brechnungskorrektur finden sich etwa in Kotowski (1988), Murase et al. (2008), Maas (2015) und Wimmer (2016).

Im Gegensatz zur radiometriebasierten Methode, bei welcher Inhomogenität in der Bodenbeschaffenheit (Vegetation, unterschiedliche

Substrattypen) einen negativen Einfluss auf die Genauigkeit der Messergebnisse haben, ist die Variation im Fall der Mehrmedienphotogrammetrie von Vorteil, da diese Textur erzeugt. Diese ist wiederum Grundvoraussetzung für jede Art der photogrammetrischen Oberflächenrekonstruktion. Allerdings kommt es auch bei guter Bodentextur mit zunehmender Wassertiefe durch die kontinuierliche Strahlbrechung in der Wassersäule zu Unschärfen, welche die bereits oben erwähnten Genauigkeitseinbußen hervorruft (Maas, 2015). Mittlerweile steht allerdings mit dem Semi Global Matching (SGM) ein Verfahren der dichten Bildzuordnung zur Verfügung, welches auch texturarme Bereiche qualifiziert überbrücken kann (Hirschmüller, 2008; Wenzel et al., 2013). Der Einsatz dieser Technik für den Unterwasserbereich wird derzeit für alpine Flüsse und Seen sowie für Küstenbereiche erprobt (Wimmer, 2016; Mandlbürger, 2018a). Die darin angestellten Vergleiche mit Referenzmessungen zeigen eine Abnahme der Genauigkeit und Zuverlässigkeit mit zunehmender Wassertiefe. Zurückzuführen ist dies einerseits auf das Verwischen der Textur (Blurring) und andererseits auf die derzeit noch unzureichenden Möglichkeiten einer räumlich-zeitlich hochaufgelösten Erfassung und Modellierung der dynamischen Wasseroberfläche als Grundlage für präzise Refraktionskorrektur.

1.3 Laserbathymetrie

Im Gegensatz zu den in Abschnitt 2.1 und 2.2 behandelten bildbasierten Verfahren, stellt die Laserbathymetrie (englisch: Airborne Laser Bathymetry, ALB) ein aktives Verfahren dar, bei der die Erfassung von Flachwasserbereichen mittels eines gepulsten, grünen Lasers erfolgt (Guenther et al., 2000). Die Entfernung zwischen Sensor und Ziel wird durch die Messung der Laufzeit eines sehr kurzen Laserpulses (Wellenlänge $\lambda = 532 \text{ nm}$, Pulsdauer $\Delta t = 1-2 \text{ ns}$) durch Luft und Wasser bestimmt. Dabei wird der Laserstrahl an der Wasseroberfläche teilweise reflektiert und der verbleibende Teil dringt in den Wasserkörper ein. Beim Eintritt in den Wasserkörper erfährt der Laserstrahl abhängig von den optischen Eigenschaften des Wassers eine Richtungsänderung sowie eine Reduktion der Ausbreitungsgeschwindigkeit gemäß dem Snellius’schen Brechungsgesetz (Gleichung 4, $v_W \approx v_L / 1.33 \approx 225564 \text{ km/s}$). Durch die geringere Lichtgeschwindigkeit in Wasser erscheinen die unkorrigierten 3D-Unterwassermesspunkte im Gegensatz zur photogrammetrischen Methode zu tief und müssen entsprechend nach

oben korrigiert werden. Eine effiziente Implementierung der Refraktionskorrektur findet sich etwa im Hydrographiepaket der wissenschaftlichen Laserscanning Software OPALS (Pfeifer et al., 2014).

In der Wassersäule unterliegt die Laserstrahlung der Dämpfung durch kontinuierliche Strahlbrechung und Signalabsorption, sodass nach der Reflexion des Laserpulses am Boden und dem entsprechenden Rückweg nur eine geringe Strahlungsintensität am Sensor ankommt. Der generelle Zusammenhang zwischen ausgesandter und empfangener Energie wird durch die Laser-Radar-Gleichung beschrieben (Pfeifer et al., 2016), welche für bathymetrische Anwendungen in die Signalanteile von der Wasseroberfläche, der Wassersäule, dem Gewässerboden und der Hintergrundstrahlung inklusive von Verlusten in der Atmosphäre aufgeteilt wird (Abdallah et al., 2012; Tuldahl and Steinvall, 2004).

$$P_R = P_{WS} + P_{WC} + P_{WB} + P_{BK} \quad (6)$$

Gleichung 6 hat dabei dieselbe Form wie Gleichung 1. Die Signalverluste in der Laserbathymetrie sind damit äquivalent zu denen, die bereits in Abschnitt 2.1 für die radiometriebasierte Tiefenmessung beschrieben wurden. Dies trifft auch auf die exponentielle Dämpfung in der Wassersäule zu. Ein wesentlicher Vorteil der Laserbathymetrie ist, dass die Signalabschwächung, die in der Regel durch den effektiven Dämpfungskoeffizienten k beschrieben wird, aus der asymmetrischen Form der aufgezeichneten Wellenformen geschätzt werden kann (Richter et al., 2017; Schwarz et al., 2017). Zwischen dem Dämpfungskoeffizienten k und der sogenannten Secchi Tiefe d besteht ein direkter Zusammenhang ($d = 1.6/k$). Die Secchi Tiefe bezeichnet dabei jene Distanz, ab der man die diametralen schwarzen und weißen Quadranten einer Scheibe mit 20 cm Durchmesser, die vom Boot aus an einer Senkschnur ins Wasser gelassen wird, nicht mehr von einander unterscheiden kann. Die Hersteller von bathymetrischen Sensoren beschreiben die Tiefenmessperformance meist in Vielfachen der Secchi Tiefe.

Bei den bathymetrischen Laserscannern unterscheidet man zwischen Instrumenten, die für maximale Eindringtiefe optimiert sind und solchen, die auf möglichst hohe räumliche Auflösung und gleichzeitige Erfassung von Topographie und Bathymetrie ausgelegt sind. Erstere erreichen eine maximale Tiefe von etwa der dreifachen Secchi Tiefe (ca. 15–50 m bei klaren Küstengewässern) und verwenden dazu sehr hohe Pulsenergie

(3–7 mJ), eine verhältnismäßig lange Pulsdauer (4–7 ns), geringe Pulswiederholraten (3–10 kHz) und große Strahldivergenz (7 mrad). Die große Eindringtiefe wird dabei durch ein geringeres räumliches Auflösungsvermögen erkauft (Größe des Laserabdrucks an der Wasseroberfläche ≈ 3 –7 m). Im Gegensatz dazu setzen die sogenannten topobathymetrischen Sensoren auf hohe räumliche Auflösung (Strahldivergenz ≤ 1 mrad, Größe des Laserfootprints ≤ 60 cm, Pulsrate 70–550 kHz, Punktdichte im Einzelstreifen: ca 10–20 Punkte/m²) auf Kosten der maximalen Penetrationstiefe (ca. 1.5-fache Secchi Tiefe). Geräte dieser Art sind vor allem für Flachwassergebiete, die Wasserwechselzone und die simultane Erfassung der ufernahen Topographie optimiert (Mandlbürger, 2018b).

Die Erfassung der Wasseroberfläche ist eine Voraussetzung für die Refraktions- und Laufzeitkorrektur der rohen Messungen. Die meisten bathymetrischen Scanner betreiben dazu zusammen mit dem grünen Laser einen weiteren Kanal im nahen Infrarot (NIR: $\lambda = 1064$ nm), da die Signalabsorption in Wasser für NIR Strahlung sehr hoch ist und diese daher nur minimal in die Wassersäule eindringt. Andere Geräte verzichten auf diesen zusätzlichen Kanal, wodurch die Luft-Wasser-Grenzschicht allein aus den Reflexionen des Grünkanals modelliert werden muss. Da die Echos von der Wasseroberfläche oftmals eine Mischung aus direkter Reflexion und Volumenstreuung in den ersten cm der Wassersäule darstellen, sind in diesem Fall spezielle Auswerte- und Modellierungsmethoden erforderlich (Mandlbürger et al., 2013; Mandlbürger et al., 2015; Schwarz et al., 2017). Speziell für topo-bathymetrische Scanner mit kleinem Laserfootprint muss die Nicht-Planarität und Dynamik der Wasseroberfläche (Wellen) in Betracht gezogen werden, um präzise 3D Punktkoordinaten des Gewässerbodens zu erhalten (Westfeld et al., 2017). Vergleiche gegenüber Echolot oder tachymetrischen Referenzmessungen haben für Laserbathymetrie in Abhängigkeit des Gewässertyps (Küsten- oder Binnengewässer), der Trübheit, der Wassertiefe und der Rauigkeit der Wasseroberfläche eine Tiefenmessgenauigkeit im Bereich von 10–60 cm ergeben (Hilldale and Raff, 2008; Kinzel et al., 2013; Fernandez-Diaz et al., 2014; Mandlbürger et al., 2015; Song et al., 2015).

3. Laufende Forschungsaktivitäten

Der Trend in der Entwicklung von flugzeuggetragenen Sensoren geht in Richtung hybrider Messsysteme bestehend aus Laserscannern und multispektralen Kameras. Dies gilt für alle namhaften Hersteller (Leica Geosystems, Teledyne Optech, RiegI) und für topographische (Leica: CityMapper/TerrainMapper, Teledyne Optech: Galaxy, RiegI: VQ-1560i) wie auch bathymetrische Sensoren (RiegI VQ-880-G, Teledyne Optech CZMIL Nova, Leica Chiroptera II). Durch die zeitgleiche Aufnahme von Bildern und Scans gewinnt eine integrierte Auswertung der Daten von aktiven und passiven Fernerkundungssystemen zunehmend an Bedeutung. Die folgenden Themen werden daher zur Zeit im Rahmen des DFG Forschungsprojekts „Bathymetrie Vermessung durch Fusion von Flugzeuglaserscanning und multispektralen Luftbildern“ am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart behandelt:

- Die beschriebenen optischen Fernerkundungsmethoden zur Bathymetrieableitung werden derzeit jeweils getrennt angewandt. Es wird erwartet, dass die Ausnutzung der komplementären Messtechniken zu einer Steigerung der Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Vollständigkeit des abgeleiteten Digitalen Geländemodells (DGM) der Unterwassertopographie führt.
- Laserbathymetrie ist ein monochromatisches Messverfahren mit einer Wellenlänge im grünen Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Speziell für klares Wasser bieten kurzwelligere Kanäle von multi- oder hyperspektralen Sensoren ggf. auch eine bessere Durchdringung der Wassersäule. Dies trifft auch auf Wellenlängen an der unteren Grenze des sichtbaren Spektrums zu (Coastal Blue, $\lambda = 400 - 460$ nm).
- Tiefen aus Laserbathymetrie stellen optimale Referenzdaten für die Kalibrierung der Tiefen- und Substrattypenbestimmung aus multispektralen Bildern dar. Dieser Umstand kann genutzt werden, um automatische Prozessierungsketten für Multispektraldaten zu erstellen.
- Die Stärke von Laserbathymetrie gegenüber bildbasierten Verfahren liegt darin, dass die Gewässertiefe nicht über Radiometrie (Signalstärke, Textur), sondern über Laufzeitmessung abgeleitet wird. Wissen über die Wassertiefe reduziert die verbleibenden Unbekannten für radiometriebasierte Bathymetrieverfahren (vgl. Gleichung 2). Durch die Fusion simultan aufgezeichneter Bild- und Scandaten ist demnach

eine erhöhte Unterscheidbarkeit von Substrattypen (Sand, Schotter, Blöcke, festes Gestein) und Unterwasservegetation zu erwarten.

- Moderne Verfahren der Objektklassifizierung (Conditional Random Fields, Convolutional Neural Networks) sind in der Lage räumliche Kontextinformation einzubeziehen. Durch entsprechende Anpassungen und Erweiterungen dieser Verfahren hinsichtlich der Einbeziehung integraler Daten von aktiven und passiven Sensoren wird eine weitere Steigerung der Klassifikationsgenauigkeit angestrebt.
- Während die räumliche Auflösung der Laserbathymetrie durch die Größe des Laserabtastflecks (ca. > 50 cm) begrenzt ist, ist durch dichte Bildzuordnung mit Mehrmedienphotogrammetrie eine Auflösung im Bereich der Ground Sampling Distance (GSD) des Bildmaterials möglich. Durch Fortschritt in der Kameratechnologie und wegen der für bathymetrische Aufnahmen stets moderaten Flughöhe (ca. 500–600 m) sind heute Bodenpixelgrößen (GSD) kleiner als 10 cm als Stand der Technik zu betrachten. Zwar bewirken Refraktions- und Streuungseffekte Unschärfen am Gewässerboden, aber dennoch hat Mehrmedienphotogrammetrie in Kombination mit modernen Dense Matching Verfahren das Potenzial, die Erfassung von Objektdetails im seichten Bereich zu verbessern (Mandlbürger, 2018a).

Die aufgezählten Forschungsfragen werden dabei anhand konkreter Untersuchungsgebiete bearbeitet. Zur Verfügung stehen Daten der deutschen Ostseeküste (Song et al., 2015), von alpinen Flüssen (Mandlbürger et al., 2015) sowie von hochalpinen und voralpinen Seen (Mandlbürger, 2018a; Mandlbürger et al., 2018). Bei allen Aufnahmen wurden zeitgleich Daten von topobathymetrischen Laserscannern und mehrkanaligen Kameras (RGB, gelegentlich NIR und Coastal Blue) aufgezeichnet. Zur Evaluierung stehen Referenzmessungen aus terrestrischer Vermessung oder Echolotaufnahmen zur Verfügung.

4. Anwendungsbeispiele

In diesem Abschnitt zeigen exemplarische Ergebnisse die Stärken und Schwächen der Bathymetrieerfassung mittels aktiver und passiver optische Flugzeugfernerkundung. Die Untersuchungsgebiete liegen im hochalpinen Bereich (Grünausee, Blaue Lacke, Stubaitaler Alpen, Sulzenau, $46^{\circ}59' \text{ N}$; $11^{\circ}11' \text{ O}$) sowie in der Nähe von Augsburg (Autobahnsee, $48^{\circ}24' \text{ N}$; $10^{\circ}56' \text{ O}$). In

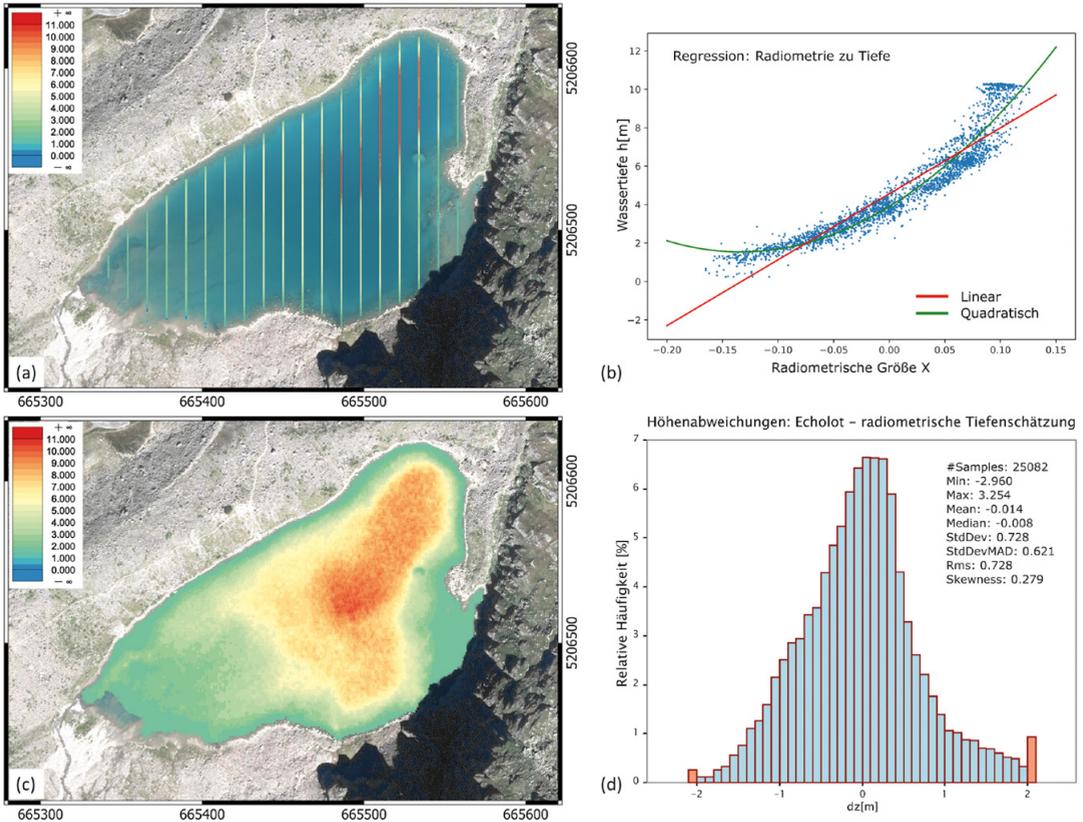


Abb. 4: Ergebnisse der radiometriebasierten Tiefenbestimmung an der Blauen Lacke: (a) RGB Orthophotomosaik überlagert mit ausgewählten Echolot-Profilinien und farbkodierter Gewässertiefe, (b) Regression zwischen radiometrischer Kenngröße X und Wassertiefe h, (c) flächenhafte Tiefenkarte aus Bildradiometrie, (d) Histogramm der Tiefenabweichungen (Soll-Ist-Vergleich).

beiden Fällen erfolgte die Datenerfassung durch die Firma AHM (Innsbruck) mit einem Riegl VQ-880-G topo-bathymetrischen Laserscanner aus einer Flughöhe von 500–600 m über Grund. Bei einer Lasertakte von 550 kHz und einer Flugeschwindigkeit von etwa 100 Knoten beträgt die Punktdichte im Einzelstreifen für beide Gebiete etwa 20 Punkte/m² und der Durchmesser des Laserabtafleckes am Boden etwa 55–70 cm.

Die Befliegung der hochalpinen Seen in den Stubaier Alpen erfolgte im August 2017. Simultan mit den Full Waveform Laserscannerdaten wurden auch Luftbilder mit einer IGI/Hasselblad H39 Mittelformatkamera aufgenommen (39 Mpix, RGB, Längsüberdeckung 80 %, GSD: 10–15 cm). Weiters stellte das Land Tirol Luftbilder der Landesbefliegung aus dem Jahr 2015 und 2016 zur Verfügung (Vexcel UltraCam Eagle, 196 Mpix, RGBI, Längs-/Querüberdeckung: 80 % / 50 %, GSD: 15 cm). Echolotreferenzdaten wurden von der Universität Innsbruck, Arbeitsbereich

Wasserbau im Juli 2017 erfasst. Die ursprünglich zeitgleich geplante Befliegung konnte witterungsbedingt erst einige Wochen später und bei sub-optimalen hydrologischen Bedingungen (hoher Schwebstoffanteil in Folge von Starkregenereignissen) durchgeführt werden (Mandlbürger, 2018a). Da vor allem die Luftbildaufzeichnung 2016 zu einem Zeitpunkt mit klarem Wasser erfolgte, ist in Abbildung 4 ein Beispiel für radiometriebasierte Tiefenbestimmung aus multispektralen Bildern auf Basis von ausgewählten Echolot Profillinien als Referenz dargestellt.

Die Erfassung des Autobahnsees sowie einiger anderer künstlicher Seen in der Umgebung von Augsburg (Bayern, Deutschland) erfolgte im April 2018. Spezifisches Ziel dieses Experimentes war die Untersuchung der Eignung von kurzwelligem Coastal Blue Bildmaterial ($\lambda = 400\text{--}460\text{ nm}$) für die Bathymetrieerfassung im (vor)alpinen Bereich. Dazu wurden neben dem Laserscanner zwei IGI DigiCAM 100 Kameras eingebaut (Sensorgröße:

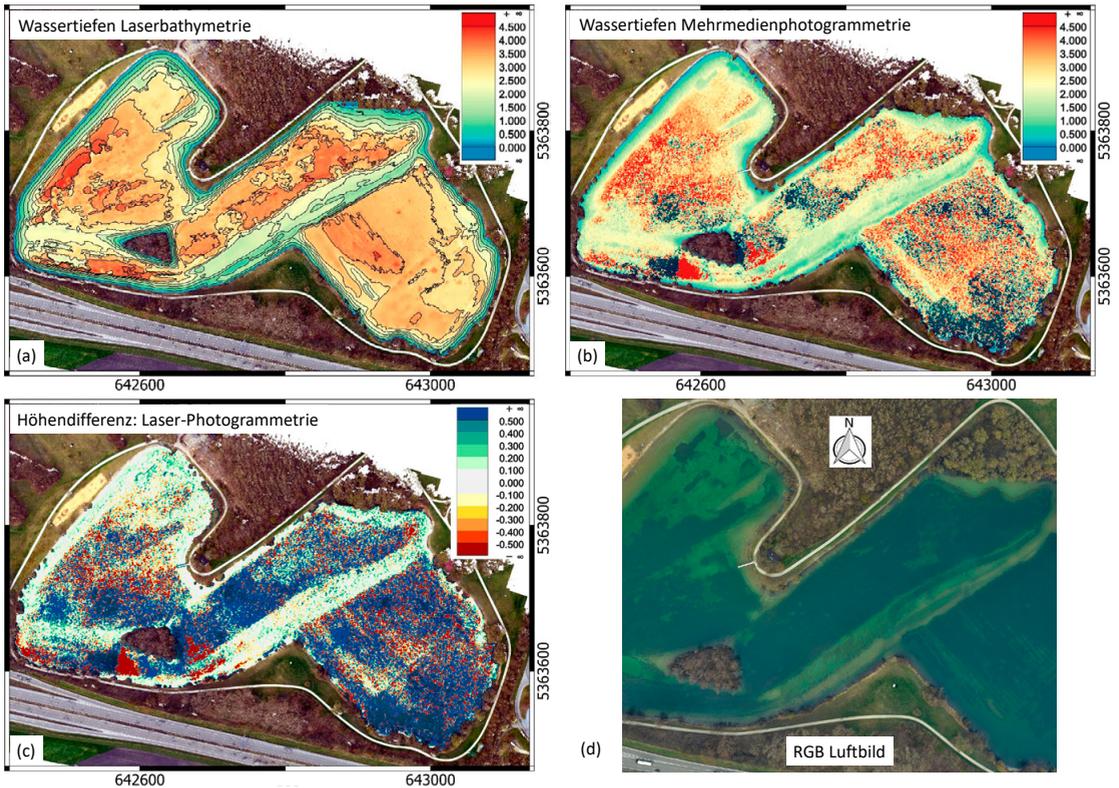


Abb. 5: Ergebnisse der Tiefenbestimmung aus Mehrmedienphotogrammetrie: (a) Orthophoto überlagert mit Lasertiefenmodell (farbkodierte Tiefenkarte und Tiefenlinien), (b) Orthophoto überlagert mit Tiefenkarte aus Mehrmedienphotogrammetrie, (c) Abweichungen der Tiefen aus Laserscanning und Photogrammetrie, (d) Ausschnitt aus RGB Luftbild (genordet).

11608 × 8708 pixel, GSD: 5 cm). Neben einer RGB Kamera mit Bayerfilter, wurde ein zweiter panchromatischer Sensor durch einen vorgesetzten Filter zu einer monochromatischen Coastal Blue Kamera umgebaut. Bei beiden Sensoren handelt es sich um adaptierte PhaseOne iXU-RS 1000 Kameras mit 50 mm Rodenstock Objektiv. Aufgrund der klaren Wasserbedingungen, der relativ geringen Wassertiefen (0 - 4.6 m) und der guten radiometrischen und geometrischen Auflösung des Kamerasystems ist dieser Datensatz gut für Mehrmedienphotogrammetrie und Laserbathymetrie (vollständige Erfassung des Seebodens) geeignet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt.

5. Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 4 (Blaue Lacke, Stubaitaler Alpen) zeigt in vier Teilabbildungen den gesamten Prozess der radiometriebasierten Tiefenbestimmung. Basierend auf dem multispektralen Orthophoto

und ausgewählter Echolot-Profillinien (Abbildung 4a) erfolgte zunächst die polynomiale Regression (Abbildung 4b) zwischen einer radiometrischen Messgröße (Bild) und der Wassertiefe (Echolot), gefolgt von deren Anwendung auf alle Wasserpixel des Orthophotos (Abbildung 4c) bis hin zum Soll-ist-Vergleich (Abbildung 4d) in Bezug auf die gesamten flächenhaft erfassten Multibeam-Echolotreferenzdaten vom Juli 2017. Einerseits kann festgestellt werden, dass mit Hilfe weniger Referenzmesspunkte eine vollflächige Rekonstruktion der Seetopographie aus dem multispektralen Bildmaterial gelingt. Abbildung 4b zeigt dabei, dass die verwendete radiometrische Größe (natürlicher Logarithmus des Bandverhältnisses aus blau und grün) den Zusammenhang zwischen Radiometrie und Tiefe nicht gänzlich zu linearisieren vermochte (vgl. Gleichungen 2–4). Regression mit einem Polynom zweiten Grades liefert hingegen ein zufriedenstellendes Modell. Das daraus entstandene Tiefenmodell (Abbildung 4c) weist zwar lokales

Rauschen auf, gibt aber die generelle Struktur der Seetopographie detailliert wieder. Insbesondere sei der etwa $5 \times 4 \text{ m}^2$ große Felsblock nahe beim östlichen Seeufer (Abbildung 4a, 3. Echolotprofilinie) erwähnt, der gut im flächenhaften Tiefenmodell (Abbildung 4c) abgebildet ist. Die erzielte Gesamtgenauigkeit kann aus dem Histogramm der Soll-Ist-Höhenabweichungen (Abbildung 4d) abgelesen werden. Demnach ist die Schätzung erwartungstreu (Mittelwert/Median: $-1.4/-0.8 \text{ cm}$) mit einem robusten Streuungsmaß (StdDevMAD, MAD=Median of Absolut Differences) von 62.1 cm . Dies entspricht etwa 5 % der Wassertiefe. Stumph et al. (2003) berichten in ihren Ergebnissen von einer Genauigkeit besser 30 %. Der Grund für die bessere Genauigkeit des Blaue Lacke Datensatzes ist die Homogenität des Sohlsubstrats und des Wasserkörpers in der hochalpinen Region ohne nennenswerten Pflanzenbewuchs.

Die Erfassung von Gewässertiefen aus den Scan- und Bilddaten vom August 2017 beschränkte sich auf den unmittelbaren Uferbereich bis zu einer maximale Eindringtiefe von ca. 3.5 m. Dies zeigt klar die Grenzen der Bathymetrieerfassung durch optische Fernerkundung auf. Die Secchi Tiefe wurde im August 2017 mit 2.4 m gemessen, während diese im Juli 2017 zum Zeitpunkt der Echolotaufnahme beim Grünausee noch $>10 \text{ m}$ betrug. Während die Sonarvermessung weniger stark von der Gewässertrübheit beeinflusst und darüber hinaus generell für größerer Messtiefen geeignet ist, sind klare Wasserbedingungen eine Grundvoraussetzung für den Einsatz jeglicher Fernerkundungsmethode, die im optischen Bereich des elektromagnetischen Spektrums operiert.

Abbildung 5 zeigt die Performance von Laserbathymetrie im Vergleich zur Mehrmedienphotogrammetrie für das Untersuchungsgebiet Autobahnsee (Augsburg). Konkret sind in den Abbildungen 5a und 5b das Orthophotomosaik überlagert mit dem Seeboden-Tiefenmodell abgeleitet aus Laserbathymetrie und Mehrmedienphotogrammetrie dargestellt. In Abbildung 5c sind die Höhenabweichungen zwischen laser- und bildbasierter Messung zu sehen und Abbildung 5d schließlich zeigt ein ausgewähltes RGB Luftbild aus dem Zentralbereich des Autobahnsees. Im gegenständlichen Fall können die Laserbathymetriegergebnisse insofern als Referenz angesehen werden, als auch bei der maximalen Tiefe von 4.6 m noch ausreichend Signalstärke für eine zuverlässige Streckenmessung vorhanden ist. Die Refraktionskorrektur wurde für beide Messmetho-

den auf Basis eines Wasseroberflächenmodells aus den Laserechos von der Wasseroberfläche durchgeführt. Da es aus der Literatur bekannt ist, dass grüne Laserstrahlung einerseits an der Oberfläche reflektiert wird aber andererseits auch in den Wasserkörper eindringt, wurde für die Modellierung der Oberfläche ein statistischer Ansatz gewählt (Mandlbürger et al., 2013). Das Beispiel zeigt damit die Synergie der simultanen Erfassung von Laser- und Bilddaten, da der (grüne) Laser die Wasseroberfläche quasi als Nebenprodukt liefert, deren Kenntnis aber für Laserbathymetrie und Mehrmedienphotogrammetrie in gleicher Weise die Grundvoraussetzung für eine präzise Refraktionskorrektur darstellt.

Im Vergleich der beiden Tiefenmodelle ist zu konstatieren, dass das Lasermodell (Abbildung 5a) einen wesentlich ruhigeren und kontinuierlicheren Verlauf aufweist als das Tiefenmodell aus Mehrmedienphotogrammetrie und dichter Bildzuordnung (Abbildung 5b). Dabei ist zu bemerken, dass auch das Lasermodell stellenweise stufenartige Übergänge aufweist, die im Vergleich mit dem Luftbild unschwer als Grenzen von Vegetationsflächen ausgemacht werden können. Tatsächlich weist die 3D Unterwasser-Laserpunktwolke in gewissen Bereichen eine Durchdringung der Unterwasservegetation auf. Während diese prinzipielle Eigenschaft von Laserscanning im topographischen Fall für die DGM Erstellung im Waldbereich ausgenutzt wird, führt die starke Signalabsorption unter Wasser zu einer verminderten Durchdringungsfähigkeit. Bei sehr dichter Unterwasservegetation erfolgt dann auch keine Durchdringung, was zu den besagten Stufen im Lasertiefenmodell führt. Mit der photogrammetrischen Methode ist keine Durchdringung der Unterwasservegetation möglich, was zu den vielen blau eingefärbten Bereichen der Abbildung 4c führt, in welchen allesamt das Photomodel höher liegt als das des Lasers. Während diese Abweichungen verfahrensbedingt sind und sich auch in gleicher Weise an Land zeigen würden, zeigen die tief rot eingefärbten Bereiche mit unrealistisch großen photogrammetrisch bestimmten Gewässertiefen die Grenzen der bildbasierten Tiefenmessung auf. Eine zufriedenstellende Übereinstimmung besteht allerdings in den offenen Bereichen ohne Bewuchs. Hier ist bis zu einer Tiefe von 4 m eine gute Übereinstimmung von Laserbathymetrie und Mehrmedienphotogrammetrie gegeben (vgl. weißlich eingefärbte Bereiche in Abbildung 4c). Eine Ausnutzung der prinzipiell

höhen räumlichen Auflösung des Bildmaterials (GSD: 5 cm, Laserabtastfleck: 60 cm) kann dabei aber nur bei sehr guter Bodentextur und im sehr flachen Wasser erwartet werden.

6. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden die Grundlagen der Gewässervermessung mittels optischer Fernerkundung präsentiert, sowie Potenzial und Einschränkungen der einzelnen Messtechniken anhand konkreter Beispiele diskutiert. Die eingesetzten Methoden lassen sich grob in bildbasierte passive und laserbasierte aktive Methoden einteilen. Eine weitere Möglichkeit zur Klassifikation besteht hinsichtlich geometrie- und radiometriebezogener Verfahren. Während bei der Tiefenbestimmung aus multispektralen Bildern radiometrische Information genutzt wird und mittels Regression ein Zusammenhang zur Gewässertiefe hergestellt wird, ist die Mehrmedienphotogrammetrie ein geometriebasiertes Verfahren, wo die Radiometrie nur in Form von Grauwertunterschieden (Textur) ausgenutzt wird. Laserbathymetrie misst sowohl geometrische als auch radiometrische Größen, nämlich einerseits die Entfernung aus der Pulslaufzeit und die Stärke des empfangenen Signals. Bei allen drei Methoden unterliegen die Messsignale einer starken Absorption im Wasserkörper, abhängig einerseits von der verwendeten Wellenlänge und andererseits von äußeren Bedingungen (Trübe, Oberflächenrauigkeit). Bei den geometrischen Messverfahren (Laserbathymetrie und Mehrmedienphotogrammetrie) ist eine konsequente Modellierung der Signalwege inklusive der Berücksichtigung der Strahlbrechung erforderlich, um präzise Unterwassertopographie zu erhalten.

Vorteile für flugzeugbasierte Bathymetrieerfassung mittels optischer Fernerkundungsverfahren bestehen vor allem im Flachwasserbereich, wo etablierte Verfahren der sonarbasierten Hydrographie unwirtschaftlich, gefährlich oder gänzlich unmöglich werden. Im Gegensatz dazu ist mit Laserbathymetrie und Mehrmedienphotogrammetrie ein nahtloser Übergang zwischen Wasser und Land möglich. Der Einsatz ist allerdings auf seichte Gewässer mit klarem Wasser beschränkt. Für die Erfassung von tiefen Gewässern ist die Sonarvermessung nach wie vor die Methode der Wahl. In diesem Sinne sind flugzeugbasierte optische Bathymetrie und schiffsbasierte Echolotvermessung als komplementäre, einander ergänzende Messmethoden zu sehen.

Referenzen

- Abdallah, H., Baghdadi, N., Bailly, J.-S., Pastol, Y., Fabre, F., 2012. *Wa-LiD*: a new lidar simulator for waters. *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, 9(4), S. 744–748.
- Brown, Craig J., Smith, Stephen J., Lawton, Peter, Anderson, John T., 2011: Benthic habitat mapping: A review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 92 (3), S. 502–520.
- Christiansen, Lutz, 2016: New techniques in capturing and modelling of morphological data; HYDRO 2016 paper, Hydrographische Nachrichten, HN 105, S. 20–23
- Dietrich, J. T., 2016: Bathymetric Structure-from-Motion: extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42 (2), S. 355–364.
- EU, 1992: Council Directive 92/43/EEC on the Conservation of Natural Habitats and of Wild Fauna and Flora.
- EU, 2000: Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 Establishing a Framework for Community Action the Field of Water Policy.
- EU, 2007: Directive 2007/60/EC of the European Parliament and European Council of October 2007 on the Assessment and Management of Flood Risks.
- Fernandez-Diaz, J., Glennie, C., Carter, W., Shrestha, R., Sartori, M., Singhania, A., Legleiter, C., Overstreet, B., 2014: Early Results of Simultaneous Terrain and Shallow Water Bathymetry Mapping Using a Single-Wavelength Airborne LiDAR Sensor. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 7, S. 623–635.
- Guenther, G.C., Cunningham, A.G., Laroque, P.E., Reid, D.J., 2000: Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry. In: Proceedings of the 20th EARSeL Symposium: Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea, Dresden.
- Kinzel, P.J., Legleiter, C.J., Nelson, J.M., 2013: Mapping River Bathymetry with a Small Footprint Green LiDAR: Applications and Challenges. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 49 (2013), S. 183–204.
- Heine, Erwin, Weidinger, Johannes Thomas, Götz, Joachim, 2016a: Geologisch-geomorphologische Untersuchungen des subaquatischen Bereichs von Erdströmen in den Traunsee (OÖ) unter Anwendung von Fächerecholot und parametrischem Sedimentecholot. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI)*, Heft 1, S. 25–37.
- Heine, Erwin, Briese, Christian, Csaplovics, Elmar, Eberhöfer, Christian, Loiskandl, Willi, 2016b: Hydrographische Vermessung des Neusiedler Sees. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI)*, Heft 1, S. 9–24.
- Hilldale, R., Raff, D., 2008: Assessing the ability of airborne Lidar to map river bathymetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, S. 773–783.
- Hirschmüller, H., 2008: Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information, in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30 (2), S. 328–341.
- Hodúl, M., Bird, S., Knudby, A., Chénier, R., 2018: Satellite derived photogrammetric bathymetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 142, S. 268–277.
- Kotowski, R., 1988: Phototriangulation in Multi-Media-Photogrammetry. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* XXVII, S. 324–34.

- Legleiter C., Roberts D., Lawrence R., 2009: Spectrally based remote sensing of river bathymetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1059, S. 1039–1059, doi: 10.1002/esp.1787.
- Legleiter, C. J., 2016: Inferring river bathymetry via Image-to-Depth Quantile Transformation (IDQT). *Water Resour. Res.*, 52, S. 3722–3741, doi: 10.1002/2016WR018730.
- Lyzenga, D., 1978: Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, 17(3), pp. 379–383.
- Lyzenga, D., Malinas, N., Tanis, F., 2006: Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 44(8), pp. 2251–2259.
- Maas, H.-G., 2015: On the Accuracy Potential in Underwater/Multimedia Photogrammetry. *Sensors* 15, S. 18140–18152, doi: 10.3390/s150818140.
- Mandlbürger, G., Pfennigbauer, M., Pfeifer, N., 2013: Analyzing near water surface penetration in laser bathymetry—A case study at the River Pielach. In *Proceedings of ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Antalya, Turkey.
- Mandlbürger, G., Hauer, C., Wieser, M., Pfeifer, N., 2015: Topo-Bathymetric LiDAR for Monitoring River Morphodynamics and Instream Habitats—A Case Study at the Pielach River. *Remote Sens.*, 7 (2015), S. 6160–6195.
- Mandlbürger, G., 2018a: A Case Study on Through-Water Dense Image Matching. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42 (2), S. 659–666.
- Mandlbürger, G., 2018b: A Review of Airborne Laser Bathymetry Sensors. In: *Proceedings of 5th IAHR Europe Congress*, Trento, Italy, S. 41–42.
- Mandlbürger, G., Kremer, J., Steinbacher, F., Baran, R., 2018: Investigating the use of coastal blue imagery for bathymetric mapping of inland water bodies. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, in press.
- Mulrow, C., 2010: A flexible multi-media bundle approach. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38 (5), S. 472–477.
- Murase, T., Tanaka, M., Tani, T., Miyashita, Y., Ohkawa, N., Ishiguro, S., Suzuki, Y., Kayanne, H., Yamano, H., 2008. *A photogrammetric correction procedure for light refraction effects at a two-medium boundary. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 74(9), 1129–1136. ISSN 0099-1112.
- Pfeifer, N., Mandlbürger, G., Otepka, J., Karel, W., 2014: OPALS - A framework for Airborne Laser Scanning data analysis. *Computers. Environment and Urban Systems*, 45, S. 125 - 136.
- Pfeifer, N., Mandlbürger, G., Glira, P., 2016: Laserscanning. In: *Handbuch der Geodäsie: 5 Bände, Photogrammetrie und Fernerkundung*; W. Freedon, R. Rummel (Hrsg.); Springer, Berlin Heidelberg, 2016, ISBN: 978-3-662-46900-2, S. 1 - 51.
- 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), S. 159–167.
- Song, Y., Niemeyer, J., Ellmer, W., Soergel, U., Heipke, C., 2015: Comparison of three airborne laser bathymetry data sets for monitoring the German Baltic Sea Coast. *Proc. SPIE 9638, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2015*, 96380Z, doi:10.1117/12.2194960.
- Stumpf, R. P., Holderied, K., and Sinclair, M., 2003. *Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. Limnology and Oceanography*, 48, S. 547–556.
- Richter, K., Maas, H.-G., Westfeld, P., Weiß, R., 2017: An Approach to Determining Turbidity and Correcting for Signal Attenuation in Airborne Lidar Bathymetry. *PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 85 (2017), pp. 31–40.
- Rinner, K., 1948: *Abbildungsgesetz und Orientierungsaufgaben in der Zweimedienphotogrammetrie. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen, Sonderheft 5*; Eigenverlag: Wien, Österreich.
- Tulldahl, H. M., Steinvall, K. O., 2004: Simulation of sea surface wave influence on small target detection with airborne laser depth sounding. *Appl. Opt.*, 42(12), pp. 2462–2483.
- Wenzel, K., Rothermel, M., Haala, N., Fritsch, D., 2013: SURE – The IfP Software for Dense Image Matching. *Photogrammetric Week*, 13, Wichmann/VDE Verlag, Berlin & Offenbach, S. 59–70.
- Westfeld, P., Maas, H.-G., Richter, K., Weiß, R., 2017: Analysis and correction of ocean wave pattern induced systematic coordinate errors in airborne LiDAR bathymetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, pp. 314–325.
- Wimmer, M., 2016: Masterarbeit, Department für Geodäsie und Geoinformation, TU Wien, <http://repositum.tuwien.ac.at/urn:nbn:at:at-ubtuw:1-2619> (letzter Zugriff: 2018-09-21).
- BMNT, 2018a: https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-eu-international/eu_wasserrecht/Wasserrahmen-RL.html, (letzter Zugriff: 2018-09-21).
- BMNT, 2018b: https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-eu-international/eu_wasserrecht/Hochwasser-RL.html, (letzter Zugriff: 2018-09-21).
- UBA, 2018: http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/naturschutz/ffh_richtlinie/, (letzter Zugriff: 2018-09-21).

Anschrift des Autors

Gottfried Mandlbürger, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70178 Stuttgart, Deutschland.

E-Mail: gottfried.mandlbuerger@ifp.uni-stuttgart.de

und

Department für Geodäsie und Geoinformation, TU Wien, Gusshausstr. 27-29, 1040 Wien, Österreich.

E-Mail: gottfried.mandlbuerger@geotuwien.ac.at