Vergleich von Bathymetriedaten aus luftgestützter Laserscanner- und Kameraerfassung

CHRISTIAN MULSOW¹, GOTTFRIED MANDLBURGER^{2,3}, CAMILLO RESSL³ & HANS-GERD MAAS¹

Zusammenfassung: In diesem Beitrag werden die Verfahren Laserbathymetrie und Photogrammetrie für die Erfassung von Gewässerböden verglichen. Anhand eines kombinierten Laserscanner- und Bilddatensatzes des Autobahnsees in Bayern werden beide Verfahren ergebnismäßig einander gegenübergestellt sowie Vor- und Nachteile angeführt. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Güte der Geländemodelle sowie der Vollständigkeit und räumlichen Auflösung. Praktische Aspekte bei der Auswertung sowie die Komplexität der jeweiligen Verfahren werden vergleichend betrachtet.

1 Motivation

Die Aufnahmesysteme Laserscanner und Kamera konkurrieren im Aufgabengebiet der luftgestützten Topographieerfassung. Bis zum Aufkommen der Laserscannertechnologie war hier die klassische Photogrammetrie das exklusive Verfahren der Wahl. Über die letzten Jahrzehnte entwickelte sich Laserscanning hin zum effektiven Werkzeug zur Geländeerfassung, insbesondere durch die First-Pulse/Last-Pulse Technologie bin hin zur Full-Waveform Auswertung (PFEIFER et al. 2015). Mit dem Aufkommen von effektiven automatisierten Verfahren der Bildmessung- und Zuordnung (z.B. Structure-from-Motion) konnte die Photogrammetrie wieder einigen Boden gut machen. Beide Verfahren können einander ergänzen, wie diverse Anwendungen zeigen (MANDLBURGER et al. 2017).

Die luftgestützte Laserbathymetrie hat sich in den vergangenen Jahren als leistungsfähiges Verfahren zur Vermessung der Topografie von Gewässerböden im Flachwasserbereich durchgesetzt. Ebenfalls lassen sich für diesen Zweck klassisch erhobene Bilddaten verwenden. Bei beiden Verfahren müssen Refraktionseffekte beim Medienübergang von Luft in Wasser berücksichtigt werden. Eine Voraussetzung dafür ist die Kenntnis über die Wasserspiegellage (Trennfläche) und den Brechungsindex des Gewässers. Letzter kann aus empirischen Werten in Abhängigkeit von der Gewässerart (Salz vs. Süßwasser) und der Temperatur geschätzt werden (QUAN & FRY 1995). Schwieriger gestaltet sich die Bestimmung der Wasseroberfläche, insbesondere wenn diese durch Wellenbewegungen beeinflusst wird. Zudem müssen bei Vorliegen eines Fließgewässers lokale Stauungen und Senkungen sowie die allgemeine Neigung der Wasseroberfläche mitberücksichtigt werden. Bei der Erfassung von stehenden Gewässern ohne signifikante Wellenbewegung kann die

¹ TU Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, D-1062 Dresden, Deutschland, E-Mail: [christian.mulsow, hans-gerd.maas]@ @tu-dresden.de

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

³ TU Wien, Department für Geodäsie und Geophysik, Gußhausstraße 25, A-1040 Wien, E-Mail: camillo.ressl@geo.tuwien.ac.at

Problematik entsprechend vereinfacht werden. Die Wasseroberfläche lässt sich dann als waagerechte Ebene annehmen. Entsprechend wird nur noch die Wasserspiegelhöhe benötigt. Diese kann zum einen durch örtliche Pegelmessungen erfasst oder simultan innerhalb der Auswertung bestimmt werden.

Anhand eines Testdatensatzes sollen beide Technologien hinsichtlich Anwendbarkeit, Komplexität und Datenqualität einander gegenübergestellt werden.

2 Testdatensatz

Als Testdatensatz standen die Bild- und Laserscannerdaten einer Befliegung des Autobahnsees in Bayern nahe Augsburg zur Verfügung (Abb. 1). Es handelt sich dabei um einen künstlich angelegten, Grundwasser-gespeisten Baggersee in der Überflutungsebene des Lech Flusses. Das vorherrschende Bodensubstrat ist daher grobkörniger Kies. Die zeitgleiche Datenerfassung von Laserund Bilddaten erfolgte am 9. April 2018 im Rahmen eines Experiments, bei dem neben einem topo-bathymetrischen Laserscanner (Riegl VQ-880-G) auch zwei 100 Mpix Kameras zum Einsatz kamen. Neben der im vorliegenden Beitrag verwendeten RGB Kamera (IGI DigiCAM 100), kam auch eine pan-chromatische Kamera desselben Typs zum Einsatz, deren Empfindlichkeitsbereich mittels vorgeschaltetem Filter auf das mono-chromatische Coastal Blue (λ =400-460 nm) eingeschränkt wurde (MANDLBURGER et al. 2018). Insgesamt wurden vier Flugstreifen mit einer Fluggeschwindigkeit von 100 Knoten (50 m/s) erfasst.



Abb. 1: Aufnahmeobjekt Autobahnsee

2.1 Bilddaten

Der Bildblock besteht aus insgesamt 125 Bildern, welche aus zwei unterschiedlichen Höhen (64 Bilder aus 610m [Ground Sampling Distance (GSD): 5.6cm] und 61 Bilder aus 450m [GSD: 4.2cm]) aufgenommen wurde. Pro Höhenstufe erfolgte die Erfassung mit jeweils zwei Flugstreifgen mit rund 90% Längsüberlappung und 60% Querüberlappung (Ab. 2). Daraus folgt eine überaus hohe Redundanz der Bilddaten. Die Blockmitte ist in rund 40 Aufnahmen enthalten. Wie bereits erwähnt, kam als bildgebender Sensor eine IGI DigiCAM 100 Mediumformat-Kamera mit einer Auflösung von 10608 × 8708 Pixel (100 Mpx) und einem 50mm Objektiv zum Einsatz. Die Kamera basiert dabei auf einer PhaseOne iXU-RS 1000 (MANDLBURGER et al. 2018). Es wurden für die Untersuchungen ausschließlich die RGB-Bilddaten verwendet, da diese eine gegenüber den Coastal-Blue-Daten eine bessere Auswertbarkeit versprachen (MANDLBURGER et al. 2018). Für die Georeferenzierung standen die während des Bildfluges erfassten GNSSS/INS Daten sowie 10 am Boden signalisierte und mittels RTK-GNSS eingemessene Passpunkte zur Verfügung (siehe Abb. 2). Zudem wurden vier Targets für die radiometrische Kalibrierung des Laserscaners und des Bildmaterials eingemessen.



Abb. 2: Blockstruktur mit Passpunkten in Gelb über der in Pix4D generierten Punktwolke. (Screenshot Pix4DMapper)

2.1.1 Orientierung Bildblock

Zunächst wurde der gesamte Block in Pix4D Mapper⁴ prozessiert. Die Absolutorientierung erfolgte auf Basis der Passpunkte. In der gleichen Software wurde eine georeferenzierte Punktwolke der Oberfläche (siehe Abb. 2) sowie ein Orthophotomosaik generiert. Da innerhalb der verwendeten Software keine Modellierung von Refraktionseffekten implementiert ist, ist das extrahierte Höhenmodell (DHM) nur für die Landbereiche gültig. Bei Nichtberücksichtigung des Refraktionseinflusses weisen Unterwasserbereiche im digitalen DHM tendenziell zu geringe Tiefen auf (MAAS 2015). Für eine möglichst korrekte Bestimmung der Unterwasserbereiche ist eine Kompensation der Refraktionseffekte unabdingbar. Kommerzielle Softwareprodukte beinhalten die entsprechenden Funktionalitäten nicht. Daher wurde für die weitere Prozessierung eine spezielle Software, welche am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung an der TU-Dresden für Mehrmedien-Szenarien entwickelt wurde (MULSOW 2010), eingesetzt.

Für die Vorverarbeitung wurde der Block in MatchAT (Trimble/Inpho) prozessiert. Im Ergebnis standen automatisch generierte Verknüpfungspunkt-Messungen, manuell gemessene Passpunkte sowie Näherungswerte für die Orientierungen zur Verfügung. Eine Trennung der Verknüpfungspunkte nach Land- und Unterwasserpunkten erfolgte anhand der berechneten Punkthöhen. Aus dem orientierten Bildblock wurde anhand von manuellen Ufermessungen eine Wasserspiegelhöhe im See von 509,05 m ermittelt. Alle Punkte unterhalb dieses Schwellwertes konnten als Unterwasserpunkte angesehen werden. Circa 17000 Bildmessungen (~1000 Verknüpfungspunkte) wurden der weiteren Verarbeitung im Mehrmedien-Bündel übergeben, wobei ~1900 Bildmessungen (~120 Verknüpfungspunkte) auf den Unterwasserbereich entfielen.

Da Erfahrungen bei ähnlichen Projekten gezeigt hatten, dass eine integrierte Bestimmung der Wasseroberfläche auf Basis von Senkrechtaufnahmen in einer Bündelblockausgleichung nicht zuverlässig möglich ist (MULSOW 2018), wurde die Wasseroberfläche als Ebene (Normale in Lotrichtung) und der oben angeführten Wasserspiegelhöhe festgelegt. Eine gute Bestimmbarkeit der Trennflächenparameter bedingt große Einfallswinkel der Bildstrahlen relativ zur Oberflächennormale, da sich hier die Refraktionseffekte stärker auf die Bildkoordinaten auswirken. Projekte im Nahbereich haben gezeigt, dass selbst komplexe Trennflächen aus konvergent erstellten Bildblöcken mit hoher Genauigkeit bestimmt werden können (MULSOW 2016).

Die Bündeltriangulation erfolgte in zwei unterschiedlichen Parameterkonfigurationen, welche sich hinsichtlich der Behandlung der Unterwasserpunkte unterschieden:

- I. Simultane Bestimmung aller Unbekannten (sämtliche Orientierungen und Kameraparameter), Unterwasserpunkte als Ein-Medium-Punkte behandelt (ohne Refraktionskorrektur)
- II. Simultane Bestimmung aller Unbekannten (sämtliche Orientierungen und Kameraparameter), Unterwasserpunkte als Mehrmedien-Punkte behandelt

⁴ www.pix4d.com

Genauigkeitsparameter	I - Ohne Refraktions- modellierung	II - Mit Refraktions- modellierung
Rückprojektionsfehler s ₀ [px]	0.11	0.11
RMS Bildpunkte Land x' y' [px]	0.09/0.10	0.10/0.10
RMS Bildpunkte Wasser x' y' [px]	0.13/0.14	0.14/0.14
Kamerakonstante c _k [mm]	51.532	51.529
Hauptpunkt x _H [mm]	0.0042	0.0041
Hauptpunkt y _H [mm]	0.0287	0.0286
Radialsymetrische Verz. A1	-1.486e-05	-1.490e-05
Radialsymetrische Verz A2	3.933e-09	3.953e-09
Mittlere Genauigkeit (RMS) Verknüpfungspunkte Land X/Y/Z [cm]	0.1/0.2/2.6	0.1/0.2/2.6
Mittlere Genauigkeit (RMS) Verknüpfungspunkte Wasser X/Y/Z [cm]	0.2/0.3/3.9	0.2/0.3/5.4

Tab. 1: Ergebnisse Bündelblockausgleichung – mit und ohne Refraktionsmodellierung (Ein-Medium vs. Mehrmedien)



Abb. 3: Vergleich der Höhen (bezogen auf Wasserspiegel) der Verknüpfungspunkte aus Bündelblockausgleichung mit und ohne Refraktionsmodellierung

Aus Tabelle 1 ist ersichtlich, dass die Modellierung der Refraktion praktisch keinen Einfluss auf die Genauigkeitskennwerte der Bündelblockausgleichung hat (z.B. s0 und RMS der Bildpunktmessungen). Ein Vergleich der Verknüpfungspunktkoordinaten zeigt den hohen Grad der Übereinstimmung für die Lagekomponente (RMS 0.1cm in X und Y). Einzig die Höhen der Unterwasserpunkte differieren, wie erwartet, signifikant (siehe Abb. 3). Hohe Übereinstimmungen konnten auch für die Bildorientierungen sowie die Kameraparameter beobachtet werden (siehe Tabelle 1). Hier differieren die Werte im Bereich ihrer Standardabweichungen. Daraus lässt sich für diesen Bildblock schlussfolgern, dass eine konventionelle Orientierung des Blockes ohne Refraktionsmodellierung zulässig ist (wenn keine Höhenpasspunkte unter Wasser verwendet werden). Inwiefern sich diese Erkenntnis auf andere Bildblöcke übertragen lässt, ist Gegenstand zukünftiger Untersuchungen. Grundsätzlich kann dies jedoch für flache Gewässer (relativ zur Flughöhe) und regelmäßige Bildblöcke (Senkrechtaufnahmen, ähnliche Überlappungen) angenommen werden. Grund ist die daraus folgende Homogenität des Einflusses der Refraktion, welche primär Einfluss auf die Punkthöhen hat. Demzufolge können Standard-Programme für die Blockorientierung verwendet werden und bei der Geländemodellextraktion ist der Vorwärtsschnitt mit Mehrmedienmodellierung durchzuführen (MANDLBURGER 2018). Wie in MULSOW (2010) gezeigt, lässt sich die Modellierung der Refraktion für den Vorwärtsschnitt relativ einfach realisieren - im Gegensatz zur Bündelausgleichung oder dem Rückwärtsschnitt.

Die aus der Bündelblockausgleichung ermittelten RMS-Werte der Unterwasserpunkte sind nur um ca. Faktor 2 schlechter als die der Landpunkte. Diese Werte sind jedoch zu optimistisch, da aufgrund der festgehaltenen Wasseroberfläche und des Refraktionsindex diese Komponente des Bildstrahlweges im Modell als fehlerfrei angesehen werden. Dies ist in der Praxis jedoch nicht der Fall, womit mit einer weitaus schlechteren Höhegenauigkeit der Unterwasserpunkte gerechnet werden muss. Aufgrund des Fehlens von Kontrollmessungen im See kann die Güte der Verknüpfungspunktkoordinaten nicht durchgreifend geprüft werden. Aus vergleichbaren Projekten (MULSOW 2018) kann mit einer um Faktor 4 gegenüber von Landpunkten reduzierten Höhengenauigkeit gerechnet werden, also ~10cm statt ~5cm.

2.1.2 Punktwolkengenerierung aus Bilddaten

Die Punktwolkengenerierung besteht im Wesentlichen aus zwei Schritten –Bildmessung und Berechnung der Objektkoordinaten über (multiplen) Vorwärtsschnitt. Analog zu etablierten Verfahren zur Geländemodellextraktion wurden zunächst die Bilder paarweise in Stereonormalbilder umgewandelt. Die Festlegung der Paarungen erfolgte unter dem Gesichtspunkt möglichst großer Schnittwinkel. Daher wurden nicht direkt benachbarte Bilder als Paare definiert, sondern Paarungen mit rund 60% Überlappung. Die von Y-Parallaxen weitestgehend befreiten Bildpaare erleichtern die Suche von homologen Punkten in den Bildpaaren. Im Mehrmedienfall werden Kernlinien nicht zwangsläufig wie im Ein-Medienfall als Geraden abgebildet, sondern eher als Kurven. Aufgrund der nahezu senkrechten Aufnahmen und der relativ zum Aufnahmeabstand geringen Wassertiefe kann die Krümmung der Kernlinien als hinreichend klein angenommen und daher für die Punktzuordnung vernachlässigt werden.

Angelehnt an etablierte Matchingverfahren wurde der Suchprozess hierarchisch gestaltet (Bildpyramiden-Ansatz). Ausgangspunkt ist ein in der Auflösung um den Faktor 5 verringertes Bildpaar. Das Referenzbild wurde zunächst in ein 75×50 Zellenraster unterteilt. Für jede Zelle erfolgte dann die Bestimmung des besten Merkmalpunktes (Harris-Operator). Die extrahierten Harris-Punkte wurden dann über Least Squares Matching (LSM) im Stereopartner identifiziert und subpixelgenau vermessen (Patch-Größe 21×21 Pixel, Reduzierter Parametersatz: Verschiebung in x und ein Maßstabsparameter). Aus den Parallaxendifferenzen wurde eine Disparitätskarte der aktuellen Auflösungsstufe gebildet. Diese diente als Näherungswert für die nächst höhere Auflösungsstufe. Dieser Vorgang wurde bis zum Erreichen der vollen Auflösungsstufe iterativ durchgeführt. Die transformierten Bildkoordinaten der homologen Punktpaare dienten dann in einem finalen Matching in den originalen Bildern als Startwerte. Die über LSM mit vollem Parameterumfang gewonnenen Bildkoordinaten können als von etwaigen Refraktionseffekten unbeeinflusst angesehen werden.

Die automatische Trennung von Land- und Unterwasserpunkten erfolgte über die Analyse der Höhenwerte, welche über konventionellen Vorwärtsschnitt (ohne Refraktionskorrektur) ermittelt wurden. Punkte unterhalb des definierten Wasserspiegels wurden über Mehrmedien-Vorwärtsschnitt (MULSOW 2018) nochmalig bestimmt. Die Berechnung erfolgte auf Basis der in der Mehrmedien-Bündelblockausgleichung ermittelten Orientierungsdaten (innere und äußere) sowie der festgelegten Trennflächenparameter (Wasserebene) und des Brechungsindex von Wasser.



Abb. 4: Gematchte Höhenpunkte auf Land (schwarz) und im Wasser (blau). Die Uferlinie ist rot markiert

2.1.3 Ergebnisanalyse-Bilddaten

Der Fokus bei den Untersuchungen lag auf dem Gewässerboden, daher konzentrieren sich die Betrachtungen der Oberflächengüte auf diese Bereiche. Wie Abb. 4 zeigt, wurden primär Unterwasserpunkte in Bereichen mit Struktur gefunden und bestimmt. Diese liegen konzentriert in den Ufer-

regionen, sowie an Kanten von Bewuchszonen. Dies verdeutlicht den Hauptnachteil der Oberflächenerfassung aus Bilddaten – die eklatante Abhängigkeit von auswertbaren Strukturen. Homogene Objektbereiche zeigen keine bzw. fehlerhafte Messungen. Es konnten Punkte bis zu einer Wassertiefe von ca. 4m (bei einer max. Gewässertiefe von ca. 4.5m) hinreichend zuverlässig bestimmt werden (siehe auch Abb. 5).



Abb. 5: Interpoliertes Höhenmodell aus Daten des Bildblockes mit unterlegtem Orthophotomosaik. Die Höhen sind relativ zum Wasserspiegel (Höhe 0) in [m] angegeben

Die Genauigkeit kann über das Tiefenspektrum hinweg keineswegs als homogen angesehen werden. Wie erwartet, fällt die Abbildungsqualität mit steigender Wassertiefe ab. Daraus lässt sich auch ein Abfallen der Genauigkeit ableiten. In Ermangelung von Referenzmessungen im Wasser kann dieser Effekt nicht hinreichend quantifiziert werden.

Die hohe Überlappung (längs und quer) im Bildblock und somit der Punktwolken aus den Stereobildpaaren erlaubt eine Abschätzung der relativen Genauigkeit innerhalb der Gesamtpunktwolke. Für diesen Zweck wurden die Punktwolken zweier Bildpaare aus verschiedenen Flugstreifen verglichen (2915/2921 und 3088/3093). In beide Punktwolken wurde zunächst jeweils eine kubische Spline-Oberfläche eingepasst und Höhenwerte auf ein 0.5m Raster gerechnet. Über den Vergleich der Höhenwerte in jedem Rasterpunkt konnte eine hohe Übereinstimmung beider Modelle festgestellt werden (RMS 4.4 cm, Abweichungen im Mittel im mm-Bereich, also kein Offset). Einzig Bereiche mit wenigen Messungen (kontrastarm, südlicher Bereich) zeigen deutlich höhere Abweichungen (max. 22 cm). Die in Tab.1 angegebene Höhengenauigkeit für Unterwasserpunkte konnte damit bestätigt werden. Die Schnittgeometrie der homologen Bildstrahlen von Unterwasserpunkten ist theoretisch schlechter als von vergleichbaren Landpunkten. Aufgrund der Brechung der Strahlen hin zum Oberflächenlot (höherer Brechungsindex von Wasser) verkleinert sich dementsprechend der Schnittwinkel im Medium Wasser.

Zur visuellen Kontrolle des Modells wurde das DHM mit dem Wasserspiegel verschnitten und in den Bildraum projiziert. Wie Abb. 7 zeigt, folgt die berechnete Schnittlinie der realen Uferlinie im Bereich weniger Dezimeter.



Abb. 6: Analyse der relativen Genauigkeit anhand von Höhenabweichungen (in [m]) von überlappenden Punktwolken aus Stereobildpaaren (2915/2921 [Sterne], 3088/3093 [Kreise])

3 Laserbathymetrie

3.1 Orientierung Laserblock

Die zeitgleich mit den Bildern aufgezeichneten Messungen des topo-bathymetrischen Laserscannersystems wurden separat ausgewertet. Zur Verfügung standen neben der Trajektorie der 4 Flugstreifen (GNSS/INS), die mittels Kalman Filterung in der Applanix Sofware Pospack⁵ ausgewertet

⁵ https://www.applanix.com/products/pospac-mms.htm

wurde, die Scannermessungen Entfernung, Auslenkwinkel, sowie zusätzliche Attribute wie kalibrierte Amplitude und Reflektivität pro Echo, die aus der online Analyse der aufgezeichneten vollen Wellenform ermittelt wurden (PFENNIGBAUER et al. 2014). In Analogie zur Bündelausgleichung des Bildblocks wurde zunächst eine Laserscanning Streifenausgleichung mit dynamischer Trajektorienkorrektur (GLIRA et al. 2016) durchgeführt. Die im Anschluss an die Streifenausgleichung durchgeführte Qualitätskontrolle (RESSL et al. 2008) des Flugblocks ergab eine robust abgeschätzte Standardabweichung (σ_{MAD}) von 1.0.cm. Diese wurde aus den Höhendifferenzen in glatten Bereichen überlappender Flugstreifen bestimmt.

Der Vorteil des robusten Streuungsmaßes σ_{MAD} gegenüber der normalen Standardabweichung (σ =6.5cm) ist die Unempfindlichkeit gegenüber Ausreißern. Da die Maskierung der glatten Bereiche, welche für die Qualitätsbeurteilung maßgeblich ist, nicht perfekt ist, verfälschen Höhendifferenzen im rauen Geländebereich (z.B. am Rande von Vegetation oder Gebäuden) die Standardabweichung durch das Quadrieren der Residuen ungebührend stark. Es sei ferner noch angemerkt, dass die Höhendifferenzen nach der Streifenausgleichung im Mittel Null betragen, die Schätzung daher unverfälscht (un-biased) ist. Da keine für die absolute Georeferenzierung des Laserblocks erforderlichen Passflächen vorlagen, wurde dieser nach der Streifenausgleichung durch eine Starrkörpertransformation auf den bereits über die Passpunkte absolut orientierten Bildblock eingepasst.

3.2 Bestimmung Wasserspiegel und Refraktionskorrektur

Die Laserstrahlen werden an der Wasseroberfläche beim Eintritt in das optisch dichtere Medium Wasser zum Lot hin gebrochen. Gleichzeitig verringert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Beide Phänomene sind durch das Brechungsgesetz von Snellius festgelegt und hängen von den Brechnungsindizes in Luft ($n_L \approx 1.0$) und Wasser ($n_W \approx 1.33$) ab. Die unkorrigierten Messstrahlen erscheinen dabei im Gegensatz zur Mehrmedienphotogrammetrie zu tief.

Für die Refraktions- und Laufzeitkorrektur ist daher ein digitales Modell der Wasseroberfläche erforderlich. Laserbathymetrie weist dabei den Vorteil auf, dass Reflexionen des Lasersignals an der Wasseroberfläche genauso empfangen werden wie vom Gewässergrund. Aufgrund des hohen Grads an gerichteter Reflexion, ist die Signalantwort grüner Laserstrahlung von der Luft-Wasser-Grenzschicht meist eine Mischung aus Reflexionen von der Oberfläche und Volumenstreuung aus den ersten cm der Wassersäule (GUENTHER et al. 2000). Für die Festlegung der Wasseroberfläche wurde daher der statistische Ansatz von MANDBURGER et al. (2013) verwendet. Dabei werden alle Laserechos in einem Höhenband von bis zu 50cm unterhalb einer grob festgelegten Näherungshöhe analysiert und in ein Raster einsortiert. Die Wasseroberfläche wird anschließend je nach Gewässertrübe als hohes Quantil (95%-99%) der einzelnen Zellpunkte berechnet. Für die relativ klaren Wasserbedingungen des Autobahnsees wurde das 99% Quantil und eine Zellgröße von 10m verwendet. Das derart berechnete Wasseroberflächenmodell weist eine maximale Undulation von 15cm auf, wobei die Wasseroberfläche im Bereich südlich der Insel tendenziell etwas höher liegt als der umgebende Wasserspiegel. Eine Anhebung der Wasserstandshöhe ist auch bei den Randpixeln im Übergang vom benetzten zum trockenen Bereich zu beobachten und dort auf eine Überschätzung der Wasseroberfläche durch gelegentliche Landpunkte zurückzuführen. Die maximale Wasserspiegelhöhe wurde daher mit h=509.10m begrenzt, wobei die mittlere aus den Laserdaten ermittelte Höhe bei 509.00m liegt. Der Mittelwert ist damit um 5cm tiefer als die für den Bildblock als konstant angenommene Höhe von 509.05cm. Die eigentliche Refraktionskorrektur erfolgte schließlich für jedes Echo durch Verschnitt des Laserstrahlvektors (ray tracing) mit dem Wasseroberflächenmodell und anschließender Refraktions- und Laufzeitkorrektur des Laserstrahlverlaufs im Wasser. Dadurch erfährt jeder rohe Unterwasser-3D-Punkt sowohl eine Lage- als auch eine Höhenkorrektur. Die praktische Durchführung erfolgte mit dem Programmsystem OPALS (PFEI-FER et al. 2014).



Abb. 6: Interpoliertes Höhenmodell aus Laserscannerdaten mit unterlegtem Orthophotomosaik. Die Höhen sind relativ zum Wasserspiegel (Höhe 0) angegeben.

3.3 Filterung und DGM Berechnung:

Nach den oben beschriebenen Vorbereitungsschritten erfolgte die Filterung der Punktwolke in Boden (trocken und benetzt) und Nicht-Boden (niedrige, mittlere, hohe Vegetation, Gebäude, etc.) mittels hierarchischer robuster Interpolation (PFEIFER et al. 2015). Eine zusätzliche Klassifizierung in Seeboden, Seeoberfläche und Punkten aus der Wassersäule erfolgte im Nachgang auf Basis des Wasseroberflächenmodells. Aus den land- und wasserseitigen Bodenpunkten wurde schließlich ein regelmäßiges DGM Raster mit einer Gitterweite von 50cm berechnet (Abb. 6). Während wegen der hohen Punktdichte von mehr als 25 Punkten/m² prinzipiell auch eine noch kleinere Gitterweite möglich gewesen wäre, wird die effektiv erzielbare räumliche Auflösung vom Durchmesser des Laserstrahlkegels (50-60cm) beschränkt.

Für die Abschätzung des Genauigkeitspotenzials der 3D Punktwolke ist neben der Genauigkeit der Trajektorie (GNSS/INS) und der Entfernungs- und Auslenkwinkelmessung auch die Unsicherheit in der Bestimmung der genauen Lage und lokalen Neigung der Wasseroberfläche und des Brechungsindexes zu berücksichtigen. Aus der Erfahrung bei Projekten ähnlicher Messtiefe und

Gewässertrübung kann ein Höhenfehler von ≤10cm als konservative Schätzung angegeben werden. Da für die DGM Berechnung praktisch flächendeckend Punkte aus allen vier Flugstreifen vorhanden sind, kann für die relative DGM Genauigkeit (precision) von einem Wert von etwa 5cm ausgegangen werden.

4 Vergleich der Resultate

Der Vergleich der Höhenmodelle aus Bildauswertung und Laserscanning offenbart eine hohe Übereinstimmung für Uferzonen ohne Bewuchs sowie für Gewässerbereiche mit ausreichend auswertbarer Textur im Bildmaterial (siehe Abb. 7). Abweichungen über ±20cm wurden aus genannten Gründen vom Vergleich ausgeschlossen. Der Abdeckungsgrad des aus Laserbathymetriedaten gewonnenen DHM ist klar höher als das aus Bilddaten generierte DHM. Der Vorteil des aktiven Messverfahrens Laserscanning gegenüber der passiven Bildaufnahme bei texturschwachen Messobjekten wird hier abermals deutlich.

Die Absolutgenauigkeit kann leider in Ermangelung von Referenzmessungen im See nicht durchgreifend analysiert werden. Eine hinreichend aussagekräftige Einschätzung ist jedoch über die Berechnung der jeweiligen Uferlinien durch Schnitt aus DHM und Wasserspiegel möglich. Die Projektion der berechneten Uferlinie in das Bildmaterial erlaubt die visuelle Beurteilung der Übereinstimmung mit der realen Uferlinie. Aus Abb. 8 ist ersichtlich, dass die Schnittlinie aus Laserdaten (rote Linie) der realen Wasserlinie im Bereich von wenigen Dezimetern folgt. Bei der Beurteilung gilt es jedoch zu bedenken, dass das Gelände im Uferbereich recht flach verläuft und daher der Schnitt mit der Wasseroberfläche schleifend ist.

Die Uferlinie aus dem Bild-DHM folgt in den Uferbereichen ohne Bewuchs der realen Wasserlinie und somit der Linie aus Laserdaten ebenfalls im hohen Maße. In Uferbereichen mit Bewuchs wandert die Linie in Richtung See, da dort durch Vegetation verdeckte Wasserbereiche nicht in den Bildern erfasst werden konnte. Hier zeigt sich ein weiterer Vorteil der Lasereraufnahme, da diese durch Echoauswertung (Full-Waveform Analyse) auch teilweise verdeckte Bereiche erfassen kann.



Abb. 7: Höhenunterschiede im Spektrum -± 20cm zwischen den DHM's aus Laserscannerdaten und Bildblock. Grau hinterlegte Bereiche zeigen höhere Abweichungen. Die rote Linie kennzeichnet den Uferverlauf.



Abb. 8: Uferlinien generiert aus Schnitt der jeweiligen Höhenmodelle mit dem Wasserspiegel (Rot - DHM aus Laserdaten; Blau - DHM aus Bilddaten).

5 Fazit & Ausblick

Mit den Methoden Laserbathymetrie und Mehrmedienphotogrammetrie stehen dem potentiellen Anwender zwei leistungsfähige Optionen zur Erfassung von Gewässerböden zur Verfügung. Beide unterscheiden sich hinsichtlich des Messprinzips grundlegend voneinander und weisen daher Stärken und Schwächen in den verschiedenen Charakteristika auf. Beiden gemein ist die Beeinflussung durch das Medium Wasser. Sei es durch Refraktion beim Trennflächendurchgang zwischen Luft und Wasser oder durch Dispersion und Trübung. Eine klare Empfehlung für die eine oder andere Methode kann nicht ausgesprochen werden, da die erreichbaren inneren Genauigkeiten ähnlich sind (5cm vs. 4.4cm, Streifenvergleich Laser vs. Streifenvergleich Stereobildpaare). Wie bereits festgestellt, hat die Laserbathymetrie den entscheidenden Vorteil der Unabhängigkeit von photogrammetrisch auswertbarer Textur. Dem gegenüber steht der deutlich geringere technische Aufwand für die Luftbilderfassung. Vor allem auch im Hinblick auf flexibel einsetzbare unbemannte Flugsysteme, die mit kostengünstigen Kameras ausgestattet sind, besteht mit der Mehrmedienphotogrammetrie ein neues Anwendungsfeld für die Erfassung von Flachwasserbereichen. Im Rahmen der Bildblock-Auswertung wurden diverse Möglichkeiten zur Optimierung identifiziert. Bereits bei der Flugplanung sollte den speziellen Anforderungen an eine Unterwasserpunktbestimmung Rechnung getragen werden. Für die Realisierung größerer Triangulationswinkel sollten Objektive mit größerem Öffnungswinkel zum Einsatz kommen. Denkbar wäre auch die Nutzung von Schrägaufnahmen. Hier ist jedoch zu beachten, die Aufnahmerichtung nicht zu sehr aus der Lotrechten zu schwenken da ansonsten Welleneffekte und Totalreflektionen die Abbildungsqualität zu stark abfallen lassen würden. Für eine stabilere Lagerung des Blockes sowie für eine durchgreifende Kontrolle der Ergebnisse sollten Passpunkte am Gewässerboden signalisiert und eingemessen werden. Dies ist auch für die Laserbathymetrie zu empfehlen.

Weiterhin sollten die Möglichkeiten der automatischen Extraktion der Wasserlinie in den Bildern untersucht werden. Wie bereits in Abb. 8 verdeutlicht, kann anhand der Helligkeits- und Farbunterschiede auf die Grenzlinie zwischen Wasser und Ufer geschlossen werden (siehe auch KRÖNERT & MEICHSNER 2017 und MULSOW et al. 2014). Diese könnte extrahiert und als zusätzliche Zwangsbedingung (Höhenpasspunktlinie) in der Bündelblockausgleichung integriert werden. Besonders gut geeignet sind in diesem Zusammenhang die Infrarotkanäle von Multispektralkameras wegen des sehr ausgeprägten Grauwertunterschiedes zwischen Wasser und Land infolge der hohen Signalabsorption infraroter Strahlung im Medium Wasser.

6 Danksagung

Der Beitrag von Gottfried Mandlburger wurde durch Mitteln der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) im Rahmen des Forschungsprojektes "Bathymetrievermessung durch Fusion von Flugzeuglaserscanning und multispektralen Luftbildern" unterstützt.

7 Literaturverzeichnis

- GLIRA, P., PFEIFER, N. & MANDLBURGER, G., 2016: Rigorous Strip Adjustment of UAV-based Laserscanning Data Including Time-Dependent Correction of Trajectory Errors. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 82(12), 945-954.
- 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.
- KRÖHNERT, M. & MEICHSNER, R., 2017: Segmentation of environmental time lapse image sequences for the determination of shore lines captured by hand-held smartphone cameras. In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial In-formation Sciences IV-2/W4 (2017), 1-8.
- MAAS, H.-G., 2015: On the Accuracy Potential in Underwater/ Multimedia Photogrammetry. Sensors, **15**(8), 18140-18152.
- MANDLBURGER, G., 2018: A Case Study on Through-Water Dense Image Matching. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **42**(2), 659-666.
- MANDLBURGER, G., PFENNIGBAUER, M. & PFEIFER, N., 2013: Analyzing near water surface penetration in laser bathymetry - A case study at the River Pielach. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **II**-5/W2, 175-180.
- MANDLBURGER, G., WENZEL, K., SPITZER, A., HAALA, N., GLIRA, P. & PFEIFER, N., 2017: Improved Topographic Models via Concurrent Airborne LIDAR and Dense Image Matching, ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, IV-2/W4, 259-266.
- MANDLBURGER, G., KREMER, J., STEINBACHER, D. & BARAN, R., 2018: Investigating the use of coastal blue imagery for bathymetric mapping of inland water bodies. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42(1), 275-282. 10.5194/isprs-archives-XLII-1-275-2018.
- MULSOW, C., 2010: A flexible multi-media bundle approach. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **38**(5).
- MULSOW, C., 2016: Ein universeller Ansatz zur Mehrmedien-Bündeltriangulation. In: Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016, Th. Luhmann/Ch. Schumacher (Hrsg.), Verlag Herbert Wichmann, 266-273.
- MULSOW, C., 2018: Digital elevation models of underwater structures from UAV imagery. In: Hydrographische Nachrichten, Journal of Applied Hydrography, HN110, 14-19.
- MULSOW, C., KOSCHITZKI, R. & MAAS, H.-G., 2014: Photogrammetric monitoring of glacier margin lakes. Geomatics, Natural Hazards and Risk
- PFEIFER, N., MANDLBURGER, G. & GLIRA, P., 2015: Laserscanning. In C. Heipke (Ed.), Photogrammetrie und Fernerkundung (1st ed., pp. 1–51). Berlin Heidelberg: Springer.
- PFEIFER, N., MANDLBURGER, G., OTEPKA, J. & KAREL, W., 2014: OPALS a framework for airborne laser scanning data analysis. Computers, Environment and Urban Systems, 45, 125-

136.

- PFENNIGBAUER, M., WOLF, C., WEINKOPF, J. & ULLRICH, A., 2014: Online waveform processing for demanding target situations. In Proc. SPIE, 90800J.
- RESSL, C., KAGER, H. & MANDLBURGER, G., 2008: Quality checking of ALS projects using statistics of strip differences. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol XXXVII, 253-260.
- QUAN, X. & FRY, E., 1995: Empirical equation for the index of refraction of seawater, Appl. Opt. 34, 3477-3480