Analyse der Auswirkung der Wasseroberflächenmodellierung auf die Genauigkeit von Gewässerbodenpunkten in der Laserbathymetrie

KATJA RICHTER¹, DAVID MADER¹, PATRICK WESTFELD² & HANS-GERD MAAS¹

Zusammenfassung: Für die Refraktionskorrektur in der Laserbathymetrie werden genaue Informationen über die Geometrie der Wasseroberfläche benötigt. Grundlage für die Bestimmung des Einfallswinkels des Laserstrahls bilden Modelle der lokalen wellen-induzierten Wasseroberfläche, die aus den gescannten Wasseroberflächenpunkten abgeleitete werden. Konventionelle Methoden zur Modellierung der Wasseroberfläche vernachlässigen die lokale Krümmung der Wasseroberfläche. Die Abweichungen zwischen Wasseroberflächenmodell und tatsächlicher Wasseroberfläche verursachen einen Koordinatenversatz am Gewässerboden, der das Genauigkeitspotential des Messverfahrens limitiert.

Im Beitrag werden strengere Ansätze zur Modellierung der Wasseroberfläche vorgestellt, die auf einem parametrischen Modell sowie auf Freiformflächen basieren. Die genauere Repräsentation der Wasseroberflächengeometrie resultiert in einem geringeren Koordinatenversatz am Gewässerboden. Die Auswirkung der Wasseroberflächenmodellierung auf die Genauigkeit der Gewässerbodenpunkte wird mit Hilfe eines Laserbathymetrie-Simulators analysiert.

1 Einleitung

Die Bestimmung geometrisch korrekter Gewässerbodenpunkte in der Laserbathymetrie erfordert die Korrektur der Refraktion auf Basis des Snellius'schen Gesetzes. Grundlage für die Refraktionskorrektur ist ein Wasseroberflächenmodell, aus dem genaue Informationen über die lokale Wasseroberflächenneigung abgeleitet werden können. Durch Verschneidung des einfallenden Laserstrahls mit dem Wasseroberflächenmodell kann der lokale Inzidenzwinkel zwischen Laserstrahl und Wasseroberfläche ermittelt werden. Das Wasseroberflächenmodell wird aus allen verfügbaren Oberflächenreflexionen abgeleitet. Bei signifikant ausgeprägten Wasseroberflächenwellen dürfen allerdings nur zeitlich eng benachbarte Wasseroberflächenpunkte einbezogen werden. Wie gut das Wasseroberflächenmodell die wahre Wasseroberfläche repräsentiert, ist einerseits von den Gegebenheiten bei der Datenerfassung (Scanauflösung, Komplexität des Wellenmusters, Datenlücken) und andererseits von der Methode der Modellbildung abhängig.

Konventionelle Methoden zur Modellierung der Schnittstelle Luft-Wasser basieren auf einer starken Vereinfachung der Wasseroberflächengeometrie. Am simpelsten ist die Annahme einer horizontalen ebenen Wasseroberfläche, an welcher der Laserstrahl gebrochen wird. Schon bei kleineren Wellen kann die Abweichung von der Ebenheit zu einem signifikanten Lage- und Höhenversatz am Gewässerboden führen. In vorangegangenen Studien wurde gezeigt, dass der Lageversatz am Gewässerboden, je nach Seegang, Strahldivergenz und Wassertiefe, einige Dezimeter bis hin

¹ Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, D-01069 Dresden, E-Mail: [david.mader, katja.richter1, hans-gerd.maas]@tu-dresden.de

² Bundesamt f
ür Seeschifffahrt und Hydrographie, Sachgebiet Geod
ätisch-hydrographische Verfahren und Systeme, Neptunallee 5, D-18057 Rostock, E-Mail: Patrick.Westfeld@bsh.de

zu mehreren Metern betragen kann (WESTFELD et al. 2017). Darüber hinaus muss mit Höhenfehlern im Dezimeterbereich gerechnet werden, die sich bei nicht-horizontalem Gewässerboden durch Anteile des Lageversatzes vergrößern. Komplexere Korrekturmethoden versuchen daher, die tatsächliche Geometrie der Wasseroberfläche zu berücksichtigen, indem die detektierten Wasseroberflächenpunkte zu einem Dreiecksnetz vermascht werden (ULLRICH & PFENNIGBAUER 2011). Auch hier können Abweichungen zwischen der wahren Wasseroberfläche und der Repräsentation durch das Dreiecksnetz zu Koordinatenfehlern am Gewässerboden führen. Der Versatz in Lage und Höhe fällt jedoch geringer aus, als bei der ersten Methode (RICHTER et al. 2018). Effekte, die sich durch die Refraktion an einer gekrümmten Wasseroberfläche ergeben, werden bisher vernachlässigt.

In diesem Beitrag werden alternative Modellierungsansätze vorgestellt, die eine bessere Berücksichtigung der wahren Wasseroberflächengeometrie ermöglichen (Kapitel 2). Die Analyse der Auswirkung der Wasseroberflächenmodellierung auf die Genauigkeit der Gewässerbodenpunkte erfolgt mit Hilfe eines Laserbathymetrie-Simulators (Kapitel 3). Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Komplexität der Wasseroberflächenmodellierung direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Gewässerbodenpunkte hat (Kapitel 4).

2 Modellierung der Wasseroberfläche

Die Modellierung der Wasseroberfläche erfolgt auf Basis der gescannten Wasseroberflächenpunkte in unterschiedlichen Komplexitätsstufen. Die verschiedenen Methoden zur Wasseroberflächenmodellierung sind in Abbildung 1 dargestellt. Für den Vergleich mit konventionellen Refraktionskorrekturmethoden wird die Wasseroberfläche durch horizontale sowie lokal geneigte ebene Wasseroberflächenelemente modelliert.

Darüber hinaus werden strengere Modellierungsansätze genutzt, mit denen die lokale Krümmung der Wasseroberfläche berücksichtigt werden kann. Eine Möglichkeit stellt die lokale Modellierung der Wasseroberfläche durch ein parametrisches Modell dar. Eine weitere Möglichkeit ist die Modellierung durch eine Freiformfläche. Die Bewegung der Wasseroberfläche während der sequentiellen Abtastung eines Oberflächenelements durch den Laserscanner kann vernachlässigt werden. In Hinblick auf die hohe Pulswiederhol- und Scanrate moderner Flugzeuglaserscanner (PRR>100 kHz, Scanrate>100 Hz) ist die Betrachtungsweise als lokale Momentaufnahme gerechtfertigt.

Horizontale ebene Wasseroberflächenelemente

Zur Modellierung der Wasseroberfläche wird an jedem Wasseroberflächenpunkt ein lokales horizontal orientiertes Wasseroberflächenelement mit wellenabhängiger Höhenlage definiert (Abb. 1 (a)). Die Höhe des Wasseroberflächenelements entspricht der Höhe des zugehörigen Wasseroberflächenpunktes.

Lokal geneigte ebene Wasseroberflächenelemente

Zunächst wird aus allen Wasseroberflächenpunkten mittels Delaunay-Triangulation ein Dreiecksnetz erstellt (Abb. 1 (b), schwarz). Die Dreiecke repräsentieren die geneigten Wasseroberflächenelemente. Da es sich bei den Eckpunkten der Dreiecke um unstetige Punkte handelt, können keine



Abb. 1: Wasseroberflächenmodelle: horizontale Wasseroberflächenelemente (a), lokal geneigte Wasseroberflächenelemente (b), parametrisches Modell (c), Freiformfläche (d)

lokalen Neigungen berechnet werden. Aus diesem Grund wird das Dreiecksnetz in einem regelmäßigen Raster hochauflösend abgetastet (Abb. 1 (b), rot), wobei die Koordinaten der Rasterpunkte über lineare Interpolation im Dreiecksnetz bestimmt werden. Die lokale Neigung der Wasseroberfläche an der Stelle des Wasseroberflächenpunktes können anschließend im gesampelten Dreiecksnetz bestimmt werden.

Parametrisches Modell

Als Grundmodell für die lokale Modellierung der Wasseroberfläche bietet sich eine Fourier-Repräsentation an (Abb. 1(c)). Jede stetige zweidimensionale Funktion mit der Periode T_x in x-Richtung und T_y in y-Richtung kann in eine Fourier Reihe entwickelt werden (CSANYI & TOTH 2005):

$$f(x) = \sum_{u=0}^{\infty} \sum_{\nu=0}^{\infty} \left(a_{u\nu} \cos \frac{2\pi ux}{T_x} \cos \frac{2\pi vy}{T_y} + b_{u\nu} \cos \frac{2\pi ux}{T_x} \sin \frac{2\pi vy}{T_y} + c_{u\nu} \sin \frac{2\pi ux}{T_x} \cos \frac{2\pi vy}{T_y} + d_{u\nu} \sin \frac{2\pi ux}{T_x} \sin \frac{2\pi vy}{T_y} \right)$$
GI. 1

Die Parameter der Fourier Reihe werden durch eine Kleinste-Quadrate-Ausgleichung aus den Wasseroberflächenpunkten einer begrenzten Nachbarschaft bestimmt. Die Größe der Nachbarschaft richtet sich nach der Komplexität des Wellenmusters, welche die Anzahl der Harmonischen in x- und y-Richtung (u,v) bestimmt.

Freiformflächen

Freiformflächen werden aus abschnittsweise definierten Polynomfunktionen (z. B. B-Splines) generiert und erlauben die mathematische Beschreibung einer beliebigen Oberflächengeometrie (Abb. 1 (d)). Die Fläche wird durch folgende Gleichung mit den Punkten $P_{i,j}$ des Kontrollrasters und den B-Spline-Funktionen $N_{i,p}(u)$ und $N_{j,q}(v)$ beschrieben (GRIMM-PITZINGER & RUDIG 2005):

$$S(u,v) = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{m} N_{i,p}(u) \cdot N_{j,q}(v) \cdot P_{i,j}, \qquad Gl. 2$$

Die Parameter p und q beschreiben den Grad der Basisfunktionen und müssen nicht identisch sein. In einer Kleinste-Quadrate-Ausgleichung werden die Kontrollpunkte $P_{i,j}$ bestimmt, so dass die resultierende Freiformfläche die gegebenen Wasseroberflächenpunkte durch eine doppelt gekrümmte Fläche annähert.

3 Numerische Simulation von Laserbathymetriedaten

In vorangegangenen Studien wurde ein Laserbathymetrie-Simulator entwickelt, mit dem die Datenerfassung für beliebige Wellenverhältnisse, Aufnahmekonstellationen und Sensoren nachgebildet werden kann (WESTFELD et al. 2017; RICHTER et al. 2018). Die Simulation umfasst die Modellierung der Wasseroberfläche, des Gewässerbodens, der Plattformbewegung, des Scanmechanismus, der Strahldivergenz und der Refraktion an der Wasseroberfläche.

Für die Modellierung der wellen-induzierten Wasseroberfläche wird das von TESSENDORF (2001) entwickelte Modell für Ozeanwellen verwendet. Es stellt eine gute Basis für die Simulation einer realistischen Ozeanoberfläche dar. Da es sich aber nicht ohne Weiteres invertieren lässt, ist es prinzipiell für die Erzeugung des Wasseroberflächenmodells aus gescannten Wasseroberflächenpunkten ungeeignet. Mit Hilfe des Modells wird für jeden Zeitpunkt *t* ein Höhenfeld in Form eines dichten regelmäßigen Rasters generiert. Das Höhenfeld repräsentiert eine realistische Ozeanoberfläche und kann über verschiedene Parameter (z. B. Gitterweite der Fourier Transformation, Windgeschwindigkeit, Windrichtung) modifiziert werden. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurden Wellen mit einer Amplitude von ca. 2 m erzeugt. Als Grenzfall wurde im Wellenmuster außerdem ein größerer Wellenberg mit 4 m Amplitude integriert. Abbildung 2 zeigt eine Momentaufnahme der resultierenden Wasseroberfläche.



Abb. 2: Simulierte Wasseroberfläche nach Tessendorf



Abb. 3: Modellierung der Strahldivergenz (a) und der Refraktion (b)

Die Modellierung des Gewässerbodens erfolgt als horizontale Ebene mit einer vom Nutzer festgelegten Rauigkeit. Die Plattformbewegung wird als gleichförmige geradlinige Translation mit konstanten Kurswinkeln modelliert. Der Scanmechanismus wird entsprechend den Spezifikationen gängiger Laserbathymetriesysteme als Palmer-Scan simuliert.

Zur Modellierung der Strahldivergenz wird der Laserstrahl in eine große Anzahl von Teilstrahlen aufgespalten (insgesamt 41 Stück), die auf der Wasseroberfläche einen Laserfootprint mit endlichem Durchmesser repräsentieren (Abb. 3 (a)). Der Intensitätsverlauf innerhalb des einfallenden Laserpulses folgt einer gaußförmigen Intensitätsverteilung. Die Modellierung der Refraktion erfolgt differentiell, indem jeder Teilstrahl separat betrachtet wird (Abb. 3 (b)). Zunächst werden die Schnittpunkte mit dem Wasseroberflächenmodell und die lokalen Wellenneigungen bestimmt. Anschließend wird für jeden Teilstrahl die Refraktion an der Wasseroberfläche nach dem Snellius'schen Brechungsgesetz modelliert und der Auftreffpunkt auf dem simulierten Gewässerboden berechnet. Der intensitätsgewichtete Schwerpunkt der Gewässerbodenpunkte aller Teilstrahlen repräsentiert die finale Bodenpunktkoordinate für den gesamten Laserstrahl. Die Simulation basiert auf der Annahme eines identischen Hin- und Rückwegs. Die Auswirkungen von Mehrfachstreuung und Dispersion werden vernachlässigt.

Die Simulation geht zunächst von idealen Bedingungen aus, d.h., dass jeder emittierte Laserpuls ein Echo an der Wasseroberfläche und am Gewässerboden erzeugt. In der Realität ist das allerdings je nach Ausrichtung der Wellen nicht der Fall. Abbildung 4 verdeutlicht die Problematik an einem Beispieldatensatz. Abbildung 4 (a) zeigt die Dichte der detektierten Wasseroberflächenpunkte in einem 1m-Raster. Um den Zusammenhang zwischen Punktdichte und Ausrichtung der Wasseroberfläche zum Laserscanner zu untersuchen, wurde der Winkel zwischen der Richtung des Laserstrahls und der Oberflächennormalen berechnet (Abb. 4 (b)). Bei ebener Wasseroberfläche beträgt der Winkel durch die bei einem Palmer-Scanner geneigte Scanachse 20°. Ein kleinerer Winkel bedeutet, dass das Wasseroberflächenelement dem Scanner zugewandt ist, ein größerer, dass es abgewandt ist. Im konkreten Beispiel liegen die Werte zwischen 10° und 30°. Der Vergleich von Punktdichte und Ausrichtung der Wellen zeigt, dass auf der dem Scanner zugewandten Seite der Wellen mehr Wasseroberflächeninformationen verfügbar sind.



Abb. 4: Beispieldatensatz: Punktdichte im 1m-Raster (a) und Ausrichtung Rasterzellen (d)

Für eine möglichst realistische Simulation der Laserbathymetriedatenerfassung soll die ausrichtungsabhängige Variation der Punktdichte berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wird die modellierte Wasseroberfläche (s. Abb. 2) in der Simulation zunächst vollständig abgescannt. Abbildung 5 (a) zeigt die resultierenden Wasseroberflächenpunkte (schwarz) sowie die 1m-Rasterzellen. Anschließend werden die simulierten Wasseroberflächenpunkte in Abhängigkeit von der Ausrichtung der Wasseroberfläche zum Laserscanner ausgedünnt. Grundlage für diese Filterung ist die Verteilung der Punktdichte im realen Beispieldatensatz (Abb. 6). Zunächst wird die Ausrichtung der Rasterzellen zum Laserscanner berechnet. Nachfolgend wird die Anzahl der Punkte pro Rasterzelle in Abhängigkeit von der Ausrichtung so reduziert, dass die Häufigkeitsverteilung dem realen Datensatz entspricht. Im konkreten Fall wird beispielsweise ein Großteil der Rasterzellen mit ungünstigster Ausrichtung komplett geleert, so dass die Punktdichte 0 Pkt./m2 wie im realen Datensatz zu 60 % vertreten ist. Abbildung 5 (b) zeigt die verbleibenden Wasseroberflächenpunkte. Der auf diese Weise erzeugte Simulationsdatensatz dient als Grundlage für die nachfolgenden Untersuchungen.



(b)

Abb. 5: Simulation der gescannten Wasseroberflächenpunkte unter idealen (a) und realen (b) Bedingungen



Abb. 6: Punktdichte im Beispieldatensatz

4 Analyse der Auswirkung der Wasseroberflächenmodellierung

Die Modellierung der Wasseroberfläche erfolgt auf Basis der simulierten Wasseroberflächenpunkte in unterschiedlichen Komplexitätsstufen. Im Gegensatz zu einer realen Messkampagne ist die lokale wellen-induzierte Wasseroberfläche in der Simulation exakt bekannt und kann für die Evaluierung der Wasseroberflächenmodellierung genutzt werden. Die nach TESSENDORF (2001) simulierte Wasseroberfläche dient als Referenz für den Vergleich mit der Wasseroberfläche, die auf Basis der in der Simulation gescannten Wasseroberflächenpunkte mit unterschiedlichen Methoden modelliert wurde. Da sich die Wellen während des Scanvorgangs in der Simulation weiterbewegen, muss die simulierte Wasseroberfläche für den Vergleich aus den einzelnen Simulationsschritten zusammengesetzt werden. Dazu werden die simulierten Wasseroberflächen in einer lokalen Umgebung um jeden gescannten Wasseroberflächenpunkt zu einer Referenzfläche kombiniert. In Abbildung 7 (a) sind die simulierte Referenzfläche (grau schattiert) und die modellierte Wasseroberfläche (farbcodiert) für die Methode mit lokal geneigten Wasseroberflächenelementen dargestellt. Die Abweichungen zwischen simulierter Wasseroberfläche und auf simulierten Scandaten basierendem Wasseroberflächenmodell können leicht berechnet werden. Für die Modellierung der Refraktion sind allerdings nur die Bereiche des Wasseroberflächenmodells relevant, in denen Messdaten vorliegen. Die Untersuchung der Abweichungen erfolgt demnach nur in diesen Bereichen (Abb. 7 (b)).

Darüber hinaus wird die Auswirkung der Wasseroberflächenmodellierung auf die Genauigkeit der Gewässerbodenpunkte untersucht. Die Simulation erlaubt die Prognose von wellen-induzierten Koordinatenverschiebungen am Gewässerboden. Dazu wird die Refraktion eines infinitesimal schmalen Laserpulses an den verschiedenen Wasseroberflächenmodellen simuliert. Der Vergleich der resultierenden Gewässerbodenpunktkoordinaten erlaubt eine Analyse der Auswirkung der Wasseroberflächenmodellierung auf den Lage- und Höhenversatz am Gewässerboden.



Abb. 7: Simulierte Wasseroberfläche (grau schattiert) und farbcodiertes Wasseroberflächenmodell in überhöhter Darstellung, (a) gesamtes Wasseroberflächenmodell, (b) Wasseroberflächenmodell in den relevanten Bereichen der Laserfootprints

5 Ergebnisse

5.1 Wasseroberflächenmodellierung

Abbildung 8 zeigt am Beispiel der Freiformfläche die Abweichungen zwischen Referenzwasseroberfläche und Wasseroberflächenmodell im Bereich der Laserfootprints. Ein Großteil der Abweichungen variiert zwischen -20 mm und 20 mm. Wie zu erwarten, treten die größten Werte am Rand der Bereiche ohne Wasseroberflächeninformationen sowie in Bereichen mit komplexerem Wellenmuster auf.

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse für horizontale und lokal geneigte Wasseroberflächenelemente, parametrisches Modell und Freiformflächen zusammengefasst. Die RMS-Werte (root mean square) deuten zum einen auf eine geringe Differenz zwischen den Wasseroberflächenmodellen und der Referenzwasseroberfläche und zum anderen auf einen geringfügigen Unterschied zwischen den Modellen hin. Die Analyse der minimalen und maximalen Abweichungen zeigt jedoch große Diskrepanzen zwischen den Modellierungsansätzen. Für das parametrische Modell variieren die minimale Abweichung und maximale Abweichung zwischen -150 mm und 279 mm. Die Werte für die Wasseroberflächenmodelle mit horizontalen bzw. lokal geneigten Elementen und die Werte für die Freiformfläche sind in ihrer Größenordnung vergleichbar und mit -107 mm bis 110 mm deutlich geringer. Die größeren Abweichungen bei der Wasseroberflächenmodellierung mit dem

parametrischen Modell deuten auf ein lokales Ausschwingen der Fourier-Repräsentation am Übergang zu Bereichen mit wenig Wasseroberflächeninformation hin. Im konkreten Fall wird die Referenzwasseroberfläche durch die Freiformfläche am besten approximiert.



Abb. 8: Abweichung zwischen Wasseroberflächenmodell nach Tessendorf (2001) und Freiformfläche im Bereich der gescannten Wasseroberflächenpunkte

「ab. 1	: Abweichungen	zwischen	Referenz u	nd Wasser	oberflächenn	nodell in	mm
--------	----------------	----------	------------	-----------	--------------	-----------	----

	Horizontale	Lokal geneigte	Parametrisches	Freiformflächen		
	Elemente	Elemente	Modell			
RMS	21	14	16	12		
min	-104	-107	-150	-74		
max	110	87	279	101		

5.2 Gewässerbodenpunkte

Die Auswirkung der Wasseroberflächenmodellierung auf die Genauigkeit der Gewässerbodenpunkte wurde für alle Wasseroberflächenmodelle untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Der Koordinatenversatz am Gewässerboden setzt sich aus den lateralen Komponenten dX und dY sowie der Tiefenkomponente dZ zusammen. Da die Auswirkungen der Wellen auf die Refraktion linear mit der Wassertiefe zunehmen, werden alle Ergebnisse in Prozent der Wassertiefe angegeben.

Für die Modellierung der Refraktion mit horizontalen Wasseroberflächenelementen ergibt sich ein RMS-Wert von 3,9% für die X-Komponente und 2,0% für die Y-Komponente. Bei einer Wassertiefe von 5 m entspricht das 19,5 cm für die X-Komponente und 10 cm für die Y-Komponente. Die Modellierung der Refraktion mit lokal geneigten Wasseroberflächenelementen resultiert in einem RMS-Wert von 2,3% für dX (11,5 cm bei 5 m Wassertiefe) bzw. 1,5% für dY (7,5 cm bei 5 m Wassertiefe). Wird das parametrische Wasseroberflächenmodell für die Refraktionskorrektur verwendet, betragen die RMS-Werte für die X- bzw. Y-Komponente 2,9% (14,5 cm bei 5 m Wassertiefe) bzw. 2,4% (12 cm bei 5 m Wassertiefe). Bei der Refraktionskorrektur mit der Freiform-fläche ergibt sich ein RMS-Wert von 1,7% (8,5 cm bei 5 m Wassertiefe) für die X-Komponente und 1,1% (5,5 cm bei 5 m Wassertiefe) für die Y-Komponente. Die Werte zeigen, dass sich der laterale Koordinatenversatz mit steigender Komplexität der Wasseroberflächenrepräsentation verringert, wobei auch die minimalen und maximalen Abweichungen (Tabelle 2) diese Tendenz bestätigen. Eine Ausnahme bildet das parametrische Modell, welches die Wasseroberfläche im kon-kreten Fall nur ungenügend repräsentiert.

	dX			dY			dZ		
	min	max	RMS	min	max	RMS	min	max	RMS
Horizontale Wasseroberflächenelemente	-6,7	12,3	3,9	-4,5	6,4	2,0	-3,2	2,2	1,0
Lokal geneigte Wasseroberflächenelemente	-8,4	8,2	2,3	-7,0	5,1	1,5	-2,5	2,5	0,7
Parametrisches Modell	-11,4	10,5	2,6	-7,4	15,5	2,4	-3,0	3,2	0,8
Freiformflächen	-6,8	4,3	1,7	-3,4	0,1	1,1	-2,0	2,2	0.6

Tab. 2: Koordinatenversatz am Gewässerboden in Prozent der Wassertiefe

Die Tiefenkomponente dZ fällt grundsätzlich kleiner aus als die beiden Lagekomponenten (RICH-TER et al. 2019). Der RMS-Wert variiert je nach Wasseroberflächenmodell zwischen 0,6 % (Freiformfläche) und 1,0 % (horizontale Wasseroberflächenelemente) (3 cm bzw. 5 cm). Die Zahlenwerte beziehen sich auf einen ebenen Gewässerboden. Bei bewegtem Gelände kann der Einfluss auf die Z-Komponente aufgrund von Strahldivergenz und Geländerepräsentationsfehler deutlich höher ausfallen.

Der absolute Koordinatenversatz am Gewässerboden wird in den Abbildungen 9 und 10 beispielhaft für die Refraktionskorrektur an lokal geneigten Wasseroberflächenelementen sowie an der Freiformfläche visualisiert. Der Koordinatenversatz wird jeweils getrennt nach den beiden Lagekomponenten und der Tiefenkomponente dargestellt. Jeder Punkt repräsentiert einen simulierten Wasseroberflächenpunkt. Die Farbcodierung entspricht dem Koordinatenversatz am Gewässerboden. Die simulierte Wasseroberfläche beinhaltet sowohl vergleichsweise glatte Wasserflächen (links und rechts) als auch einen Wellenberg (Mitte) mit einer Amplitude von 4 m (vgl. Abb. 2). Die Punktdichte variiert zwischen 0 Punkten/m² und 6 Punkten/m². Der Farbverlauf in Abbildung 9 zeigt deutlich die Auswirkung der Wasseroberflächenmodellierung auf die resultierenden Bodenpunktkoordinaten. Der Einfluss auf die Lagekomponenten ist dabei größer als der Einfluss auf die Tiefenkomponente. In Bereichen mit ausreichend Wasseroberflächeninformationen liegt der Koordinatenversatz in der Lage zwischen ± 3 mm. Außerhalb dieser Bereiche ist der Koordinatenversatz vom lokalen Wellenberg auf, dessen Geometrie durch das Wasseroberflächenmodell nur unzureichend repräsentiert wird.

Abbildung 10 zeigt den absoluten Koordinatenversatz am Gewässerboden für die Refraktionskorrektur an der Freiformfläche. Die Werte variieren zwischen ± 6 mm für die Lagekomponente und ± 2 mm für die Tiefenkomponente. Der Vergleich zwischen beiden Wasseroberflächenmodellen zeigt, dass der Koordinatenversatz am Gewässerboden durch Verwendung des komplexeren Wasseroberflächenmodells deutlich verringert wird.



Abb. 9: Koordinatenversatz am Gewässerboden in x-Richtung (a), y-Richtung (b) und z-Richtung (c) für lokal geneigte Wasseroberflächenelemente



Abb. 10: Koordinatenversatz am Gewässerboden in x-Richtung (a), y-Richtung (b) und z-Richtung (c) für Freiformfläche

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag analysiert die Auswirkung der Wasseroberflächenmodellierung auf die Genauigkeit der Gewässerbodenpunkte in der Laserbathymetrie. Neben den konventionellen Methoden zur Modellierung der Wasseroberfläche werden zwei alternative Ansätze vorgestellt, welche die lokale Krümmung der Wasseroberfläche berücksichtigen. Die Evaluierung der Modellierungsansätze erfolgt mit Hilfe eines Laserbathymetrie-Simulators. Die Abweichungen zwischen modellierter Wasseroberfläche und tatsächlicher Wasseroberfläche beeinflussen die Refraktionskorrektur und resultieren in einem Lage- und Höhenversatz am Gewässerboden. Je besser die wahre

Wasseroberfläche durch das Modell angenähert wird, desto geringer fällt der Koordinatenversatz am Gewässerboden aus. Die Analyse der Simulationsergebnisse zeigt, dass sich die Wasseroberflächenmodellierung mit einer Freiformflächen am besten für die Approximation einer gekrümmten Wasseroberflächengeometrie eignet. Während der Koordinatenversatz für die konventionelle Wasseroberflächenmodellierung mit horizontalen Wasseroberflächenelementen in Lagerichtung zwischen 2 % und 4 % und in Tiefenrichtung 1 % beträgt, verringern sich die Werte für die Wasseroberflächenmodellierung mit Freiformflächen auf 1 % für die Lagekomponente und 0,6 % für die Tiefenkomponente.

Die Erkenntnisse werden in zukünftigen Arbeiten Eingang in die differentielle Modellierung der Refraktion eines divergenten Laserpulses mit endlichem Durchmesser an einer zeitlich veränderlichen wellen-induzierten Wasseroberfläche finden und damit zur Steigerung des Genauigkeitspotentials moderner Laserbathymetriesysteme beitragen.

7 Literaturverzeichnis

- CSANYI, N. & TOTH, C.K., 2005: Some aspects of using fourier analysis to support surface modelling. Global Priorities in Land Remote Sensing.
- GRIMM-PITZINGER, A. & RUDIG, S., 2005: Freiformflächen zur Modellierung von Deformationsmessungen. zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV) 130(3), 180-183.
- RICHTER, K., MADER, D., WESTFELD, P., & MAAS, H.-G., 2018. Numerical simulation and experimental validation of wave pattern induced coordinate errors in airborne Lidar bathymetry. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences 42(2).
- RICHTER, K., MADER, D., WESTFELD, P., & MAAS, H.-G., 2019. Analyse der Auswirkung von Wellen auf konventionelle Refraktionskorrekturmethoden in der Laserbathymetrie. Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Wien, Österreich – Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 28, 334-346.
- TESSENDORF, J., 2001: Simulating ocean waters. ACM SIGGraph Course Notes.
- ULLRICH, A. & PFENNIGBAUER, M., 2011: Laser-Hydrographieverfahren. Patent WO 2011137465 A1. Riegl Laser Measurement Systems GmbH.
- 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**, 314-325.