

# Analyse der Auswirkung von Wellen auf konventionelle Refraktionskorrekturmethode in der Laserbathymetrie

KATJA RICHTER<sup>1</sup>, DAVID MADER<sup>1</sup>, PATRICK WESTFELD<sup>2</sup> & HANS-GERD MAAS<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Die geometrisch korrekte Erfassung des Gewässerbodens in der Laserbathymetrie erfordert die Korrektur der Refraktion auf Basis des Snellius'schen Gesetzes. Voraussetzung für eine strenge Refraktionskorrektur sind genaue Informationen über die Geometrie der lokalen wellen-induzierten Wasseroberfläche. Da diese Informationen in der Regel nicht verfügbar sind, basieren konventionelle Methoden zur Refraktionskorrektur auf der Einführung bestimmter Vereinfachungen. Meist werden Wellenmuster und Strahldivergenz vernachlässigt und eine horizontale oder eine lokal geneigte ebene Wasseroberfläche sowie ein infinitesimal schmaler Laserpuls angenommen. Abweichungen von den getroffenen Annahmen können zu einem signifikanten Lage- und Höhenversatz am Gewässerboden führen.*

*Zur Prognose der wellen-induzierten Koordinatenverschiebungen für beliebige Wellenverhältnisse wurde ein Simulationsansatz entwickelt. Das Kernstück der Simulation bildet die streng differentielle Modellierung der Refraktion eines Laserstrahls mit endlichem Durchmesser an einer bewegten Wasseroberfläche. Außerdem wird die Refraktion eines infinitesimal schmalen Laserstrahls an einer horizontalen und an einer lokal geneigten Wasseroberfläche modelliert. Der Vergleich der resultierenden Gewässerbodenpunktkoordinaten erlaubt eine Analyse der Auswirkung von Wellen auf die Refraktionskorrektur. Zur Validierung stehen die Ergebnisse einer experimentellen Untersuchung in einer kontrollierten Umgebung in einem Wellenbad zur Verfügung.*

## 1 Einleitung

Für die Korrektur der Refraktion auf Basis des Snellius'schen Gesetzes ist die Kenntnis des Einfallswinkels des Laserstrahls auf die lokale Wasseroberfläche erforderlich (Abb. 1,  $\alpha_{\text{lokal}}$ ). Die wellen-induzierte Neigung der Wasseroberfläche ist allerdings in der Regel unbekannt und stellt somit eine Herausforderung für die Refraktionskorrektur in der Laserbathymetrie dar. Konventionelle Korrekturmethode überwinden die Problematik der fehlenden Wasseroberflächeninformationen durch die Einführung verschiedener Vereinfachungen. Am simpelsten ist die Annahme einer horizontalen ebenen Wasseroberfläche, an welcher der Laserstrahl gebrochen wird (Abb. 1, lila). Schon bei kleineren Wellen kann die Abweichung von der Ebenheit zu einem signifikanten Lage- und Höhenversatz am Gewässerboden führen ( $dXY_{\text{hz}}$  und  $dZ_{\text{hz}}$ ). Komplexere Korrekturmethode versuchen daher, die tatsächliche Geometrie der Wasseroberfläche zu berücksichtigen, indem eine lokale Wasseroberflächenneigung für die Refraktionskorrektur verwendet wird (Abb. 1, rot). Grundlage für die Bestimmung der lokalen Wasseroberflächenneigung ist ein Wasseroberflächenmodell, das auf den detektierten Wasseroberflächenpunkten basiert, die beispielsweise zu einem

---

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

<sup>2</sup> Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Sachgebiet Geodätisch-hydrographische Verfahren und Systeme, Neptunallee 5, D-18057 Rostock, E-Mail: Patrick.Westfeld@bsh.de

Dreiecksnetz vermascht werden (ULLRICH & PFENNIGBAUER 2011). Durch Verschneidung des einfallenden Laserstrahls mit dem Dreiecksnetz kann die lokale Wasseroberflächenneigung abgeleitet

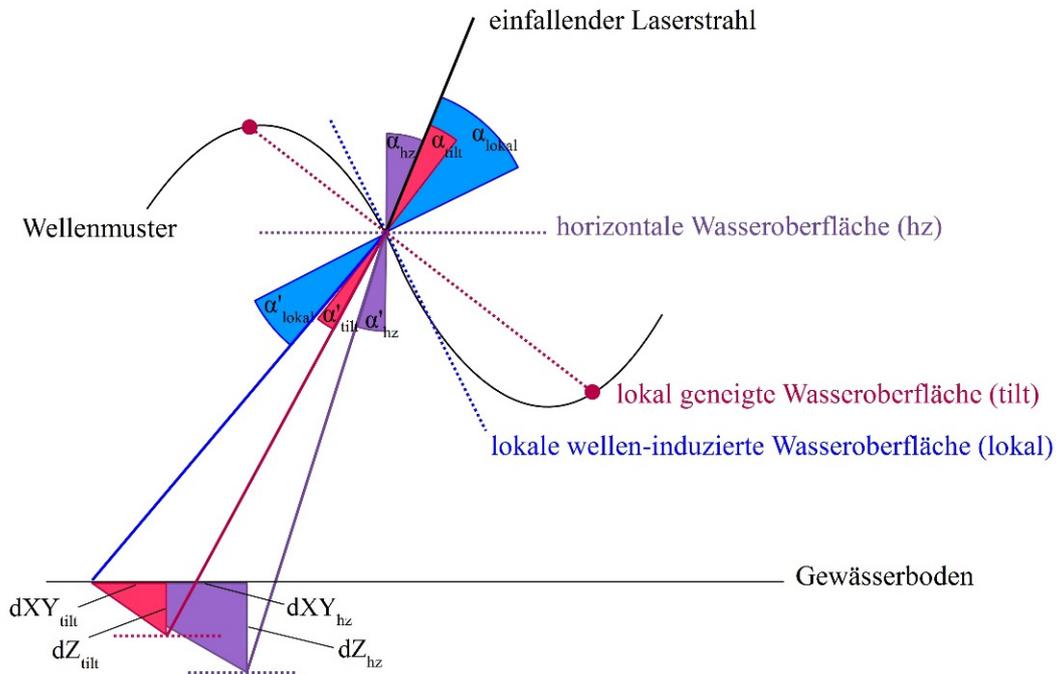


Abb. 1: Refraktion an der lokalen wellen-induzierten Wasseroberfläche (blau), der angenommenen horizontalen Wasseroberfläche (lila) und der angenommenen lokal geneigten Wasseroberfläche (rot), die im Lageversatz  $dXY_{hz}$  und  $dXY_{tilt}$  und Höhenversatz  $dZ_{hz}$  und  $dZ_{tilt}$  resultiert.

werden. Auch bei dieser Korrekturmethode können Abweichungen zwischen der wahren Wasseroberfläche und der Repräsentation durch das Dreiecksnetz zu Koordinatenfehlern am Gewässerboden führen. Der Versatz in Lage ( $dXY_{tilt}$ ) und Höhe ( $dZ_{tilt}$ ) fällt jedoch geringer aus als bei der ersten Methode. Neben der Vereinfachung der Wasseroberflächengeometrie führen beide Korrekturansätze Annahmen zur Geometrie des Laserstrahls ein, welcher als infinitesimal schmale Linie betrachtet wird.

In vorangegangenen Studien wurde ein Simulationsansatz entwickelt, mit dessen Hilfe die wellen-induzierten Koordinatenverschiebungen für beliebige Wellenverhältnisse prognostiziert werden können (WESTFELD et al. 2017). Es hat sich gezeigt, dass die laterale Verschiebung am Gewässerboden in Abhängigkeit vom Seegang bis zu 10% der Wassertiefe beträgt. Darüber hinaus muss je nach Gewässertiefe mit Höhenabweichungen im Zentimeter- bis Dezimeterbereich gerechnet werden. Die Auswirkungen der Wellenbewegungen auf die Koordinaten am Gewässerboden sind hauptsächlich stochastisch, enthalten aber auch signifikante systematische Anteile.

Dieser Beitrag zeigt eine Weiterentwicklung des bestehenden Simulationsansatzes, welche noch realistischere Prognosen der durch Wellen verursachten Koordinatenverschiebungen ermöglicht. Bisher war die Simulation auf die Betrachtung eines statischen Laserstrahls beschränkt, unter dem sich die Wellen hinwegbewegen. Für ein realitätsnahes Simulationsergebnis wird im weiterentwickelten Ansatz die Bewegung der Plattform sowie der Scanmechanismus des Laserstrahls in die Simulation integriert.

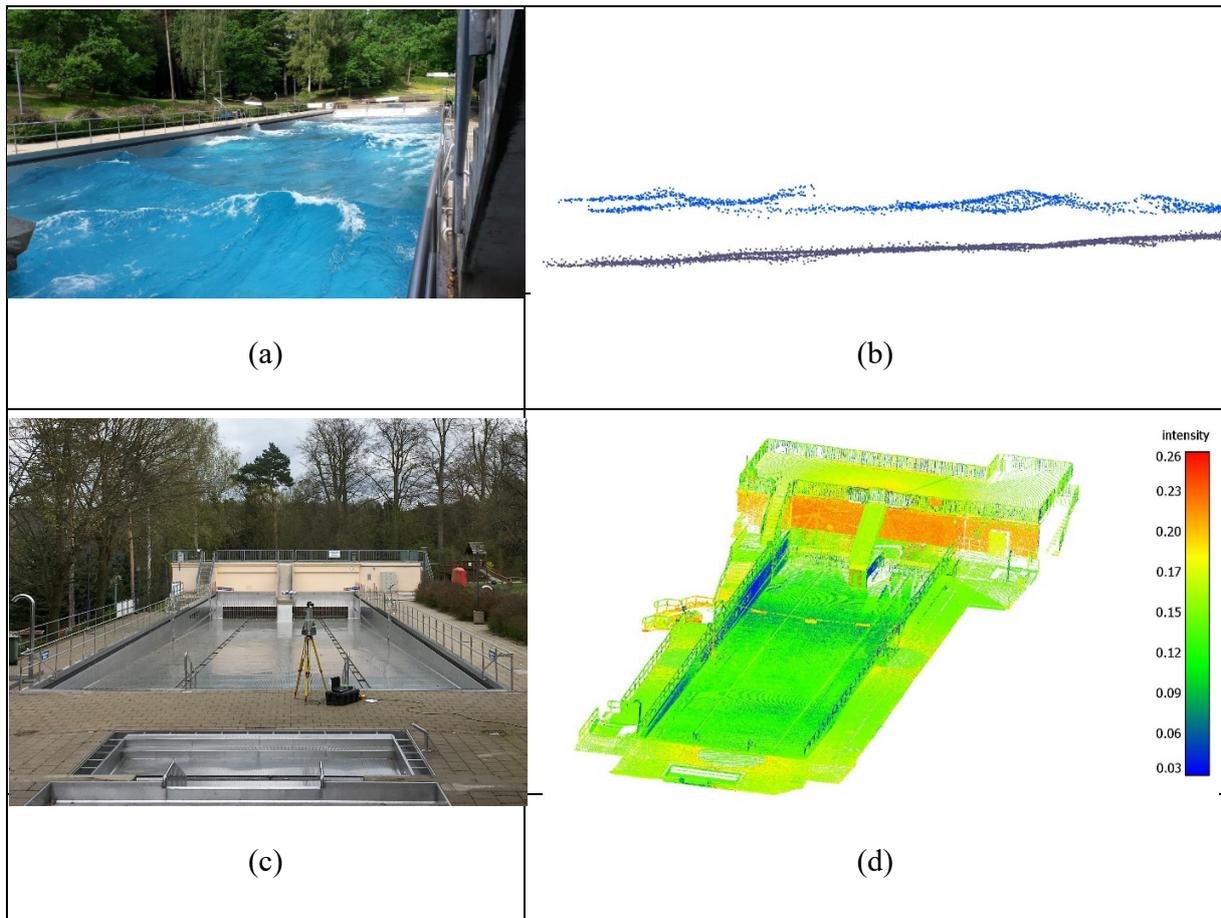


Abb. 2: Schwimmbecken während der Datenerfassung mit dem bathymetrischen Flugzeuglaserscanner RIEGL VQ 820G (a), resultierende ALB Punktwolke mit Wasseroberflächenpunkten in blau und Gewässerbodenpunkten in grau (b), Erfassung der Beckengeometrie mit dem terrestrischen Laserscanner RIEGL LMS-Z420i (c) und resultierende Referenzpunktwolke (d).

Zur Validierung der Simulationsergebnisse stehen Laserbathymetriedaten und terrestrische Referenzdaten eines Wellenfreibads zur Verfügung, welche die experimentelle Analyse der Auswirkung von Wellen auf konventionelle Refraktionskorrekturmethode ermöglichen (Abb. 2). Im Beitrag wird untersucht, inwieweit die in der Simulation vorhergesagten Koordinatenfehler zu den experimentell ermittelten Werten korrespondieren.

Das Freibad bietet kontrollierte Untersuchungsbedingungen mit zuverlässig produzierbaren Wellen, geringer Gewässertrübung und einer festen und präzise messbaren Gewässerbodengeometrie. Allerdings erreicht der schräg abfallende Boden des 12 m x 50 m großen Wellenbeckens bei horizontaler Wasseroberfläche nur eine maximale Wassertiefe von 1,6 m. Die Laserbathymetriedaten wurden mit dem Flugzeuglaserscannersystem RIEGL VQ-820-G in verschiedenen Flughöhen (500 m, 600 m, 700 m) und Flugrichtungen aufgenommen. Bei einer Strahldivergenz von 1 mrad ergibt sich auf der Wasseroberfläche ein Laserfootprint mit einem Durchmesser von 0,5 m bis 0,7 m. Die Erfassung der Referenzdaten erfolgte mit dem terrestrischen Laserscanner Riegl LMS-Z420i am abgelassenen Schwimmbecken. Abbildung 2 (d) zeigt die resultierende Referenzpunktwolke.

Tab. 1: Übersicht der für die Simulation genutzten Parameter

Plattform		Sensor	
Position [x y z] in m	[0 0 500/600/700]	Scanwinkel	20°
Orientierung [ $\omega$ $\phi$ $\kappa$ ] in °	[0 0 0]	Winkelschrittweite	0,1°
Fluggeschwindigkeit	58 m/s	Strahldivergenz	1 mrad
Wasserbecken		Pulsrepetitionsrate	520 kHz
Brechungsindex Wasser	1,33	Wellen	
Grundfläche	12 x 50 m	Windgeschwindigkeit	10 m/s
Wassertiefe	1,60 m	Gitterweite der Fourier Transformation	600
Atmosphäre		Windrichtung	45°
Brechungsindex Luft	1,000292		

## 2 Numerische Simulation

Konventionelle Refraktionskorrekturmethode vereinfachen die Geometrie der Wasseroberfläche und des Laserstrahls, um die fehlenden Informationen über die wellen-induzierte Neigung der Wasseroberfläche zu kompensieren. Schon bei leichtem Seegang treten Abweichungen von den getroffenen Annahmen auf, die zu einem Lage- und Höhenversatz am Gewässerboden führen. Ziel der numerischen Simulation ist die Vorhersage der durch Wellen verursachten Koordinatenverschiebungen für beliebige Wellenmuster. Zu diesem Zweck wird zunächst eine streng differentielle Modellierung der Refraktion eines Laserstrahls mit endlichem Durchmesser an einer wellen-induzierten Wasseroberfläche durchgeführt (Abschnitt 2.1). Außerdem wird die Refraktion entsprechend der in den konventionellen Korrekturmethode eingeführten Vereinfachungen modelliert (Abschnitt 2.2). Der Vergleich der resultierenden Gewässerbodenpunktkoordinaten erlaubt eine Analyse der Auswirkung von Wellen auf die Refraktionskorrektur.

### 2.1 Streng differentielle Modellierung der Refraktion

Die möglichst realistische Simulation der Refraktion eines Laserstrahls mit endlichem Durchmesser an einer zeitlich veränderlichen wellen-induzierten Wasseroberfläche erfordert die Modellierung der Wasseroberfläche, des Gewässerbodens, der Plattformbewegung, des Scanmechanismus und der Strahldivergenz. Die Wahl aller notwendigen Parameter (z.B. Amplitude der Wellen, Wassertiefe, Fluggeschwindigkeit, etc.) orientiert sich an den Experimenten im Wellenbad. Damit wird die Vergleichbarkeit von Simulation und experimenteller Analyse gewährleistet. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Parameter zusammengefasst.

Für die Modellierung der wellen-induzierten Wasseroberfläche wird das von TESSENDORF (2001) entwickelte Modell für Ozeanwellen verwendet. 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. Die Parameterwahl erfolgt manuell, d.h. die Parameter werden nicht durch Inversion des Tessendorfmodells aus den realen Messdaten abgeleitet. Bei der Parameterwahl wird angestrebt, das Wasseroberflächenmodell möglichst gut an die Wellensituation des Experimentes anzupassen. Ziel ist eine wirklichkeitsgetreue Reproduktion des realen Wellenmusters in der Simulation.

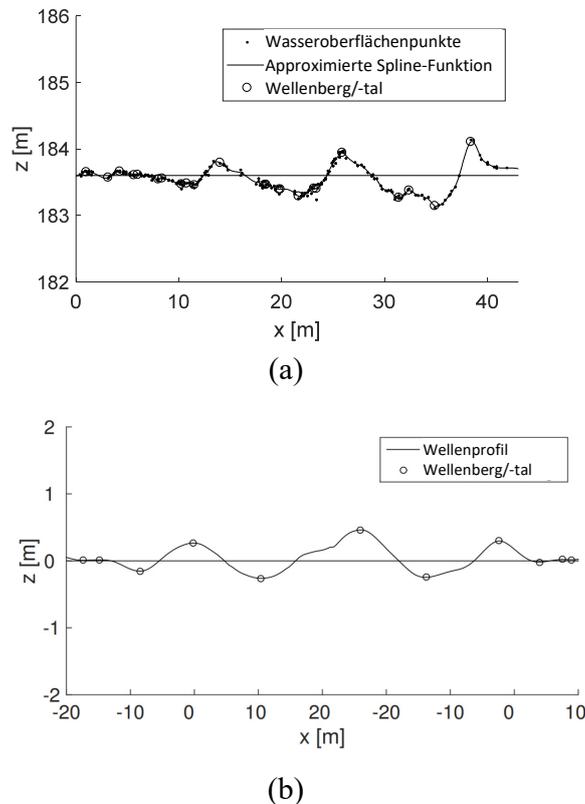


Abb. 3: Profil der Wasseroberfläche in Messdaten (a) und Simulation (b).

Zunächst erfolgt eine Analyse des realen Wellenmusters in den Messdaten. Zu diesem Zweck werden jeweils 50 cm breite Schnitte durch die Punktwolke der Wasseroberflächenpunkte zu Profilen zusammengefasst und mit Spline-Funktionen approximiert. Aus den lokalen Maxima und Minima können die maximale Amplitude und Wellenlänge des Wellenmusters abgeleitet werden. Abbildung 3(a) zeigt ein typisches Profil. Der Ursprung der Wellen ist auf der rechten Seite, wobei die Wassertiefe nach links hin abnimmt. Die horizontale Linie repräsentiert die mittlere Wasserhöhe. Anschließend wird durch die Wahl geeigneter Simulationsparameter eine Wasseroberfläche mit möglichst ähnlichen Eigenschaften modelliert. Das entsprechende Wellenprofil ist in Abbildung 3(b) dargestellt.

Die Modellierung des Gewässerbodens orientiert sich an der ebenen Charakteristik des realen Gewässerbodens. Auf das Gefälle des Beckenbodens wird verzichtet, da die Auswirkung der Neigung im Verhältnis zur beleuchteten Fläche nicht signifikant ist. Der simulierte Gewässerboden wird demnach als horizontale Ebene generiert. Die Plattformbewegung wird als gleichförmige geradlinige Translation mit konstanten Kurswinkeln modelliert. Flugrichtung, Fluggeschwindigkeit und Flughöhe orientieren sich an der Erfassung der Laserbathymetriedaten im Wellenbad.

Der Scanmechanismus wird entsprechend den Spezifikationen des verwendeten Flugzeuglaserscanners RIEGL VQ-820-G als Palmer-Scan simuliert. Die rotierende Scanachse wird in Bezug zur Flugrichtung um  $20^\circ$  geneigt und erzeugt am Boden ein elliptisch-bogenförmiges Scanmuster. Scangeschwindigkeit, Winkelschrittweite und Pulsrepetitionsrate werden den Herstellerangaben

entsprechend gewählt. Zur Modellierung der Strahldivergenz wird der Laserstrahl in eine große Anzahl von Teilstrahlen aufgespalten, die auf der Wasseroberfläche einen Laserfootprint mit endlichem Durchmesser repräsentieren. Der Intensitätsverlauf innerhalb des einfallenden Laserpulses folgt einer gaußförmigen Intensitätsverteilung, d. h. die Intensität eines einzelnen Teilstrahls ergibt sich aus seiner Lage im finiten Laserpuls.

Die Modellierung der Refraktion erfolgt differentiell, indem jeder Teilstrahl separat betrachtet wird. 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 Bodenpunktcoordinate für den gesamten Laserstrahl. Die Simulation basiert auf der Annahme eines identischen Hin- und Rückwegs. Die Auswirkungen von Mehrfachstreuung und Dispersion werden vernachlässigt.

## 2.2 Konventionelle Modellierung der Refraktion

Ergebnis der streng differentiellen Modellierung der Refraktion sind neben den Gewässerbodenkoordinaten auch die zugehörigen Wasseroberflächenpunkte. Je nach Punktdichte repräsentieren sie die tatsächliche Wasseroberfläche mehr oder weniger gut. Wie bei einer realen Messung können die Wasseroberflächenpunkte für die konventionelle Refraktionskorrektur verwendet werden. In der Praxis existieren verschiedene Korrekturansätze, die auf unterschiedlichen Annahmen basieren. In der Simulation wurden folgende Methoden umgesetzt:

- Modellierung der Refraktion eines infinitesimal schmalen Laserstrahls an einem horizontalen Wasseroberflächenelement (Methode 1)
- Modellierung der Refraktion eines infinitesimal schmalen Laserstrahls an einem lokal geneigten Wasseroberflächenelement (Methode 2)

Für die Modellierung der Refraktion nach der ersten Methode wird an jedem Wasseroberflächenpunkt ein lokales horizontal orientiertes Wasseroberflächenelement definiert, an welchem der infinitesimal schmale Laserstrahl nach Snellius gebrochen wird (Abb. 4). Die Höhe des Wasseroberflächenelements entspricht der Höhe des zugehörigen Wasseroberflächenpunktes. Mit dem berechneten Brechungswinkel wird die Richtung des aus der strengen Refraktionskorrektur resultierenden Vektors zwischen Wasseroberflächenpunkt und Gewässerbodenpunkt angepasst und die finale Bodenpunktcoordinate berechnet.

Für die zweite Methode wird zunächst aus allen Wasseroberflächenpunkten mittels Delaunay-Triangulation ein Dreiecksnetz erstellt (Abb. 5, grau). Die Dreiecke repräsentieren die geneigten Wasseroberflächenelemente. Da an den Eckpunkten der Dreiecke keine lokalen Neigungen bestimmt werden können, wird das Dreiecksnetz in einem regelmäßigen Raster hochauflösend abgetastet (Abb. 5, rot). Die Koordinaten der Rasterpunkte werden über lineare Interpolation im Dreiecksnetz bestimmt. Anschließend wird der einfallende Laserstrahl mit dem gesampelten Wasseroberflächenmodell verschnitten. Der für das Snellius'sche Brechungsgesetz benötigte Einfallswinkel wird in Bezug zur Oberflächennormalen des geschnittenen Dreiecks berechnet.

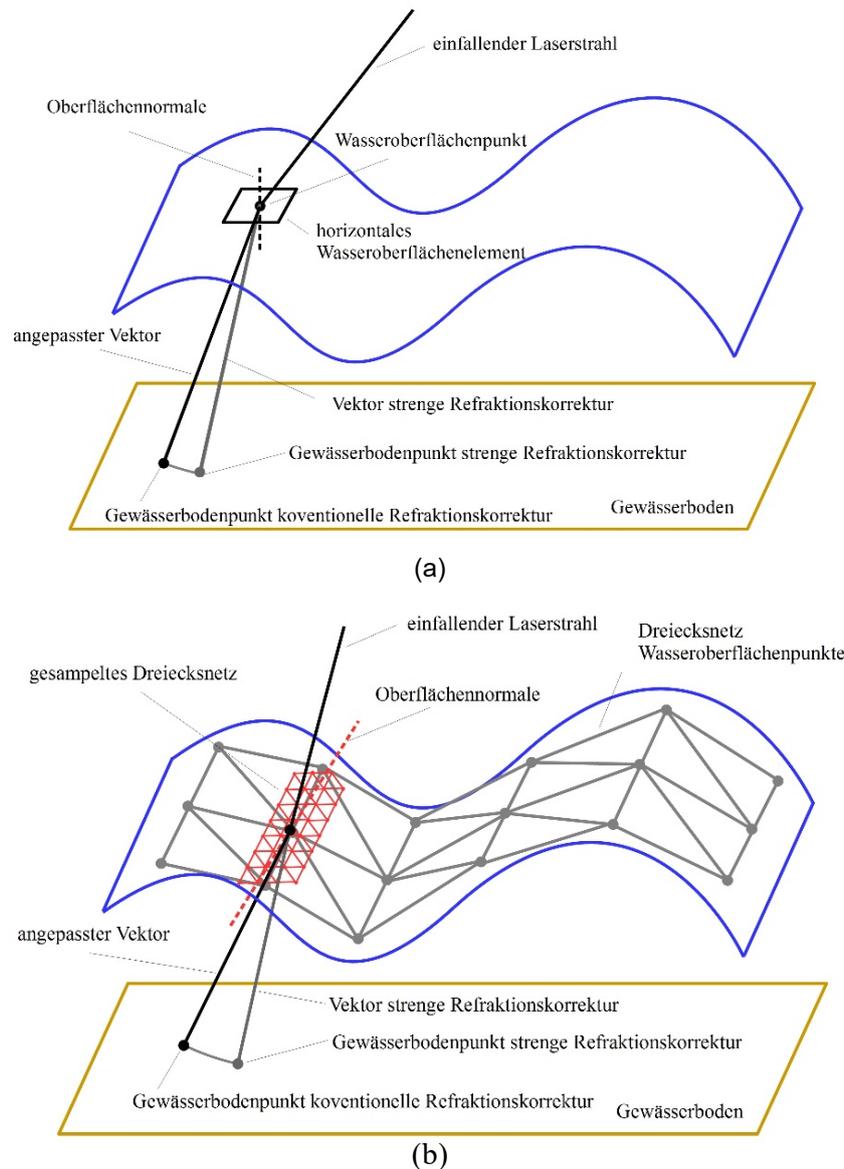


Abb. 5: Modellierung der Refraktion eines infinitesimal schmalen Laserstrahls an einem horizontalen Wasseroberflächenelement (a) und an einem lokal geneigten Wasseroberflächenelement (b).

### 3 Ergebnisse

Die numerische Simulation wurde entsprechend der Aufnahme der Laserbathymetriedaten im Wellenbad für verschiedene Flughöhen durchgeführt. Die Ausmaße des simulierten Gebietes orientieren sich an der Größe des Wellenbeckens. Insgesamt wurden zwischen 1400 und 2200 Laserpulse analysiert. Die Ergebnisse der numerischen Simulation 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.

Tab. 2: Koordinatenversatz am Gewässerboden in Prozent der Wassertiefe

	Flughöhe	dX			dY			dZ		
		min.	max.	RMS	min.	max.	RMS	min.	max.	RMS
Methode 1	500 m	-4,50	5,59	1,16	-5,21	5,09	1,18	-1,59	2,15	0,40
	600 m	-4,41	3,82	1,16	-3,95	4,01	1,14	-1,45	1,96	0,43
	700 m	-4,24	3,71	1,13	-3,91	4,46	1,18	-1,70	1,86	0,46
Methode 2	500 m	-4,54	3,25	0,78	-2,96	3,16	0,71	-1,31	1,43	0,32
	600 m	-3,16	2,76	0,68	-3,76	3,50	0,72	-1,31	1,79	0,34
	700 m	-3,26	3,11	0,72	-3,65	3,51	0,79	-1,75	1,55	0,40

Bei einer Flughöhe von 500 m ergibt sich für die Modellierung der Refraktion mit horizontalen Wasseroberflächenelementen (Methode 1) ein RMS-Wert (root mean square) von 1,16 % (max. 5,59 %) für die X-Komponente  $dX_{hz}$  und 1,18 % (max. 5,09 %) für die Y-Komponente  $dY_{hz}$ . Die Modellierung der Refraktion mit lokal geneigten Wasseroberflächenelementen (Methode 2) resultiert in einem RMS-Wert von 0,78 % (max. 3,25 %) für  $dX_{tilt}$  bzw. 0,71 % (max. 3,16 %) für  $dY_{tilt}$ . In Relation zur Wassertiefe des Wellenbades von 1,6 m ergibt sich für Methode 2 ein RMS-Wert von 1,3 cm (max. 5,2 cm) bzw. 1,1 cm (max. 5,1 cm). Die Werte zeigen, dass sich der laterale Koordinatenversatz mit steigender Komplexität der Wasseroberflächenrepräsentation verringert. Das gilt auch für die anderen beiden Flughöhen, wobei die Unterschiede in der Footprint-Größe kaum Auswirkung auf das Ergebnis haben. Die Tiefenkomponente dZ fällt grundsätzlich kleiner aus als die beiden Lagekomponenten. Für eine Flughöhe von 500 m variiert der RMS-Wert je nach Korrekturmethode zwischen 0,32 % ( $dZ_{tilt}$ ) und 0,40 % ( $dZ_{hz}$ ) (0,5 cm bzw. 0,6 cm). Mit steigender Flughöhe nimmt der Koordinatenversatz in Z-Richtung zu. Die Zahlenwerte beziehen sich auf einen ebenen Gewässerboden. Bei bewegtem Gelände kann der Einfluss auf die Z-Komponente deutlich höher ausfallen.

In Abbildung 6 ist der absolute Koordinatenversatz am Gewässerboden für beide Refraktionskorrekturmethode getrennt nach den beiden Lagekomponenten und der Tiefenkomponente dargestellt. Die obere Zeile zeigt den Koordinatenversatz für die Modellierung der Refraktion an horizontalen Wasseroberflächenelementen. Unten sind die Ergebnisse für die lokal geneigten Wasseroberflächenelemente visualisiert. Die Teilabbildungen zeigen einen 20 m x 10 m großen Ausschnitt der simulierten Daten. Sowohl die Ausbreitungsrichtung der Wellen als auch die Flugrichtung liegen entlang der x-Achse. Jeder Punkt repräsentiert einen simulierten Wasseroberflächenpunkt. Die Farbcodierung entspricht dem Koordinatenversatz am Gewässerboden. Die simulierte Wasseroberfläche beinhaltet im visualisierten Ausschnitt einen Wellenberg, der schräg durch den Ausschnitt verläuft. Der Farbverlauf in der Abbildung zeigt deutlich die Auswirkung der Welle auf die Modellierung der Refraktion sowie die resultierenden Bodenpunktkoordinaten. Der Einfluss auf die Lagekomponenten ist dabei größer als der Einfluss auf die Tiefenkomponente. Der Vergleich zwischen beiden Korrekturverfahren zeigt, dass der Koordinatenversatz am Gewässerboden durch Verwendung des komplexeren Wasseroberflächenmodells in Methode 2 verringert wird.

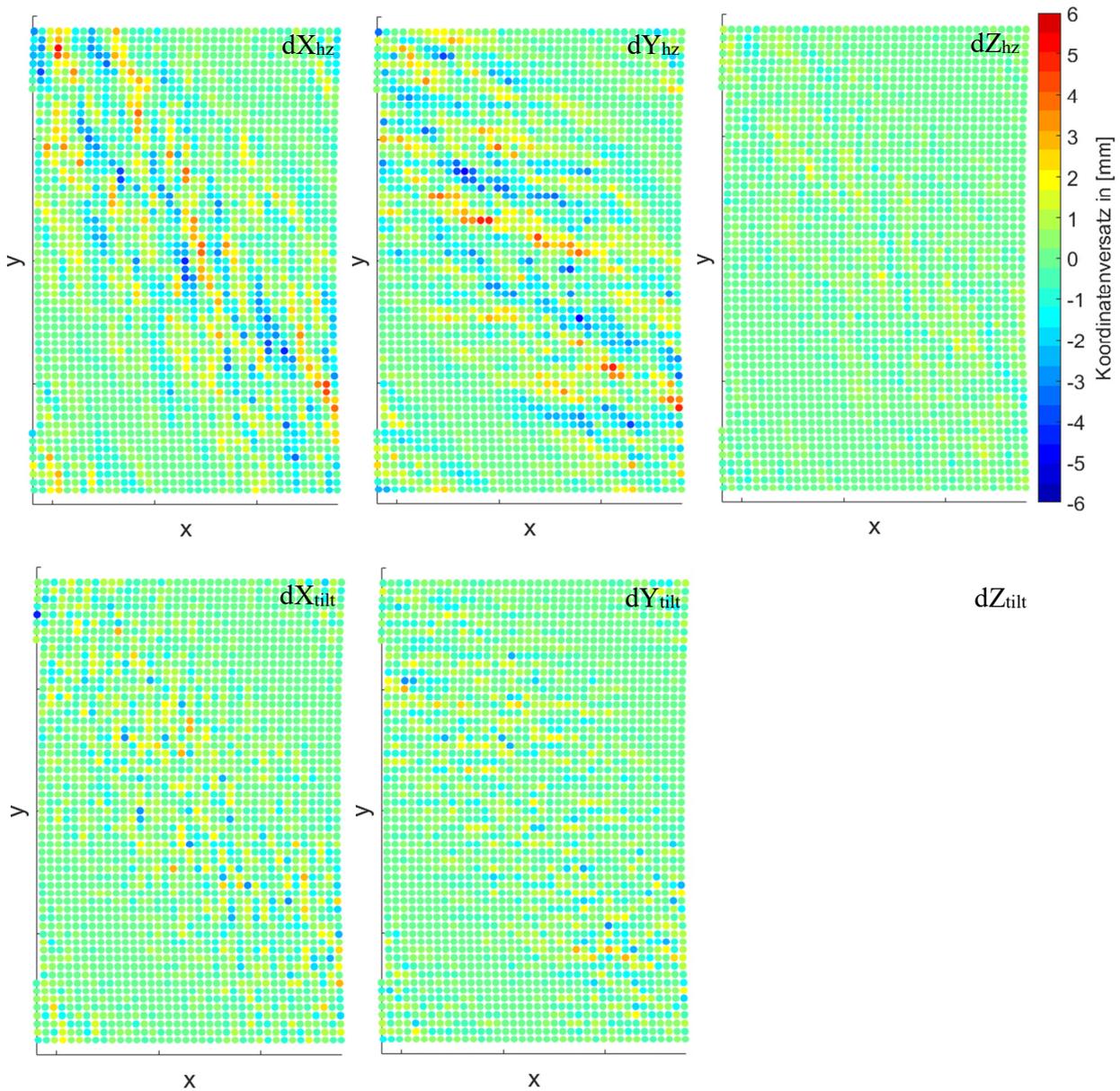


Abb. 6: Koordinatenversatz am Gewässerboden bei einer Flughöhe von 500 m für die Modellierung der Refraktion eines infinitesimal schmalen Laserstrahls an horizontalen Wasseroberflächenelementen (oben) und an lokal geneigten Wasseroberflächenelementen (unten).

## 4 Validierung

Die in der numerischen Simulation prognostizierten Koordinatenverschiebungen am Gewässerboden werden zur Validierung mit experimentell ermittelten Werten verglichen. Die Grundlage für die experimentellen Untersuchungen bilden im Wellenbad erfasste Laserbathymetriedaten sowie terrestrische Referenzdaten.

Die Laserbathymetriedaten liegen als unkorrigierte 3D-Punktwolke vor, die in Wasseroberflächen- und Gewässerbodenpunkte klassifiziert ist. Für jeden 3D-Punkt ist ein exakter Zeitstempel verfügbar. Außerdem liegen Informationen über die Sensortrajektorie sowie Herstellerangaben bezüglich der Brechungsindizes von Luft und Wasser vor. Auf Grundlage dieser Informationen wird die Refraktion mit den beiden konventionellen Methoden modelliert (s. Abschnitt 2.2). Dabei wird auch die geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laserpulses im Wasser berücksichtigt. Zur experimentellen Untersuchung der wellen-induzierten Koordinatenverschiebungen werden die Abweichungen zwischen refraktionskorrigierter ALS-Punktwolke und TLS-Referenzpunktwolke berechnet. Die Punkte am Boden des Beckens eignen sich zur Bestimmung der Tiefenkomponente  $dZ$ . Aufgrund der Ebenheit des Bodens kann die laterale Komponente  $dXY$  nur an senkrechten Wänden ermittelt werden. Die Punkte an den Wänden des Beckens können nicht verwendet werden, da sie durch den schrägen Einfallswinkel in Kombination mit dem hochreflektierenden Material von starkem Rauschen beeinträchtigt sind, welches die geometrischen Effekte überlagert. Aus diesem Grund werden nur die Punkte am Betonsockel der Wasserrutsche genutzt. In Abbildung 7 ist der Vergleich von korrigierter ALS-Punktwolke und TLS-Referenzpunktwolke am Boden des Beckens für einen Flugstreifen mit einer Flughöhe von 500 m dargestellt. Die Abweichungen zwischen den Punktwolken zeigen deutlich die Auswirkung des lokalen Wellenmusters auf die Bodenpunktkoordinaten, die Wellen pausen sich quasi zum Boden durch.

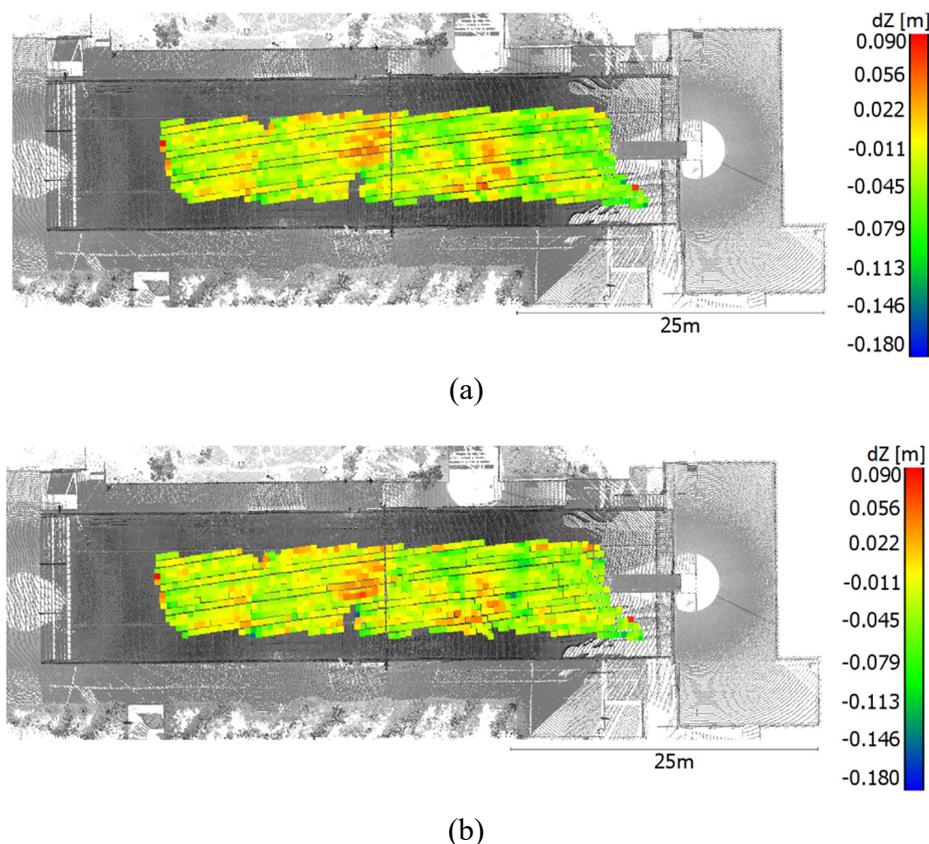


Abb. 7: Abweichung  $dZ$  zwischen refraktionskorrigierter ALS Punktwolke (farbig) und TLS Referenzpunktwolke (grau) am Beckenboden für Methode 1 (a) und Methode 2 (b).

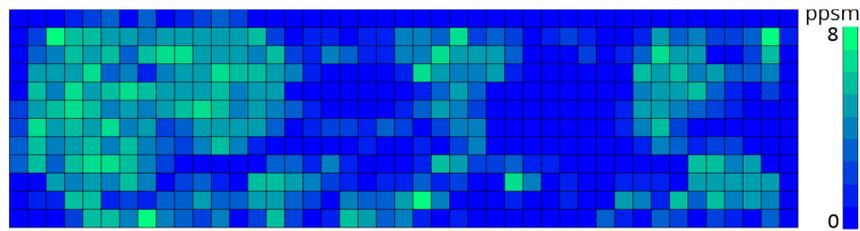


Abb. 8: Punktdichte und Verteilung der Wasseroberflächenpunkte in Punkte pro Quadratmeter.

Im Vergleich zur Dichte und Verteilung der Wasseroberflächenpunkte in Abbildung 8 wird deutlich, dass die größten Abweichungen in Bereichen auftreten, in denen nur wenige oder keine Informationen über die Wasseroberfläche vorliegen. Die Untersuchung der lateralen Abweichungen zwischen korrigierter ALS Punktwolke und TLS Referenzpunktwolke wird durch die geringe Anzahl an verwertbaren ALS Punkten am Betonsockel der Wasserrutsche limitiert. In Tabelle 8 sind die Ergebnisse für beide Refraktionskorrekturmethode dargestellt. Die Abweichungen variieren zwischen 1,8 cm und 15,6 cm. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse für alle Flugstreifen zusammengefasst. Der RMS-Wert des lateralen Koordinatenversatzes  $d_{XY}$  variiert zwischen 8,24 % und 11,01 %, während die Werte für die Tiefenkomponente vergleichsweise klein ausfallen (RMS 1,08 % bis 2,20 %). Eine Auswirkung der verschiedenen Flughöhen ist nicht sichtbar.

Insgesamt werden die in der numerischen Simulation prognostizierten Effekte durch die experimentelle Validierung bestätigt. Im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen ist die Simulation allerdings zu optimistisch. Die aus der experimentellen Untersuchung abgeleiteten Koordinatenfehler sind bis zu 10-mal größer als die in der Simulation vorhergesagten Werte. Die Ursachen dafür liegen sowohl in der numerischen Simulation als auch in der experimentellen Bestimmung der Koordinatenfehler begründet. Die Simulation basiert auf der Annahme, dass der Hin- und Rückweg des Laserstrahls identisch ist, unter Vernachlässigung von Mehrfachstreuung und diffuser Reflektion am Gewässerboden. Effekte, die auf dem Rückweg noch wirken könnten, werden demnach nicht modelliert. Außerdem wird die Dispersion aktuell noch nicht berücksichtigt. Durch diese Limitierungen fallen die in der numerischen Simulation bestimmten Koordinatenverschiebungen tendenziell zu klein aus. Ein weiterer Grund sind die Unterschiede zwischen realer und simulierter Wasseroberfläche. Wie in Abbildung 3 zu erkennen, zeichnet sich das simulierte Wellenmuster durch glattere Wellenberge aus. Außerdem wird der künstliche Charakter der maschinell erzeugten Wellen nicht optimal durch das Wellenmodell von TESSENDORF (2001) reproduziert. Das betrifft insbesondere die Reflektionen der Wellen an den Wänden des Schwimmbeckens.

Tab. 3: RMS der Abweichungen zwischen refraktionskorrigierter ALS Punktwolke und TLS Referenzpunktwolke in Prozent der Wassertiefe

	dXY RMS			dZ RMS		
	500 m	600 m	700	500 m	600 m	700
Methode 1	8,30	-	-	2,02	2,33	1,83
Methode 2	8,24	-	-	1,80	2,20	1,73

Darüber hinaus unterscheidet sich die Verteilung der Wasseroberflächenpunkte in Simulation und Experiment. Die Simulation basiert auf einer homogenen Verteilung der Scanpunkte in einem bogenförmigen Scanmuster. Im Gegensatz dazu ist die Repräsentation der Wasseroberfläche in der experimentellen Untersuchung durch eine inhomogene Verteilung der Wasseroberflächenpunkte charakterisiert. Abbildung 7 zeigt ein Beispiel für eine typische Punktverteilung im Datensatz. Die Punktdichte variiert von 0 bis 8 Punkten pro Quadratmeter. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung bleiben somit Mittelwerte für das gesamte Untersuchungsgebiet, in denen Bereiche mit hoher und niedriger Punktdichte gemittelt werden.

Eine weitere Ursache für die unterschiedlichen Ergebnisse von Simulation und experimenteller Untersuchung können systematische Fehler bei der Bestimmung der Wasseroberfläche aus den Messdaten sein. Da das grüne Laserlicht in die Wassersäule eindringt, repräsentiert die erste Interaktion des emittierten Laserpulses nicht exakt die Grenzfläche zwischen Luft und Wasser (GUENTHER 1985). In ihrer Studie konnten MANDELBURGER et al. (2013) eine mittlere Eindringtiefe von 10 cm – 25 cm nachweisen. Die näherungsweise Ableitung der Wasseroberfläche aus den nahe der Wasseroberfläche detektierten Echos erfolgt mittels statistischer Analysen. Tendenziell liegt die geschätzte Wasseroberflächenhöhe etwa 3 cm – 6 cm zu tief, was bei der Refraktionskorrektur sowohl Auswirkung auf die Lage als auch auf die Höhe der Gewässerbodenpunkte hat.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag analysiert die Auswirkungen von lokalen Wellenmustern auf die Genauigkeit der Gewässerbodenkoordinaten in der Laserbathymetrie. Der Einfluss der Wellen auf die Modellierung der Refraktion wurde sowohl in einer numerischen Simulation als auch in einer experimentellen Validierung untersucht. Die in der Simulation vorhergesagten Koordinatenfehler und die aus den realen Messdaten abgeleiteten Fehler zeigen eine konsistente Tendenz. Allerdings fallen die experimentell ermittelten Werte signifikant größer aus als die in der Simulation bestimmten Werte. Ursachen dafür sind Limitierungen in der numerischen Simulation und in der experimentellen Bestimmung der Koordinatenfehler.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss von Wellen in konventionellen Refraktionskorrekturmethode nicht ausreichend berücksichtigt wird. Im nächsten Schritt soll daher die Wasseroberfläche auf Basis der detektierten Wasseroberflächenpunkte durch ein parametrisiertes Wasseroberflächenmodell approximiert werden. Damit wird die strenge Berücksichtigung von Welleneffekten auf die Refraktion ermöglicht und die geometrische Refraktionskorrektur verbessert. Letztendlich kann ein signifikant höheres Genauigkeitspotential in der Laserbathymetrie erreicht werden.

## 6 Danksagung

Die durchgeführten Forschungsarbeiten werden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Wir danken der Firma Milan Geoservices für die Erfassung der bathymetrischen Laserscannerdaten. Außerdem geht unser Dank an Stadtbäder und Freizeitanlagen GmbH Radebeul für den Zugang zur Schwimmbadanlage und die Steuerung der historischen Wellenmaschine.

## 7 Literatur

- GUENTHER, G. C., 1985: Airborne laser hydrography: System design and performance factors. National Oceanic and Atmospheric Administration Rockville MD.
- 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, **5**, 175-180.
- 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.