

Untersuchung systematischer Tiefenmessfehler bei UAV basierter Laserbathymetrie

ROLAND SCHWARZ¹, JAN ROHMBERG-KAUERT², LUCAS DAMMERT²,
KOEN BLANCKAERT³, MARTIN PFENNIGBAUER¹ & GOTTFRIED MANDLBURGER²

Zusammenfassung: UAV basierte Laserbathymetrie hat sich in den letzten Jahren als effiziente Messmethode für die 3D Erfassung der Flachwasserzone relativ klarer Gewässer in hoher räumlicher Auflösung etabliert. Die erzielbare Eindringtiefe ist mit mehr als der 2-fachen Secchi Tiefe dabei oft tendenziell größer als bei der klassischen, flugzeugbasierten Laserbathymetrie. Allerdings wurden mittlerweile wiederholt gegenüber unabhängigen Referenzmessungen systematische Tiefenabweichungen festgestellt, mit einer Tendenz zur Überschätzung der Wassertiefe. Es steht die Vermutung im Raum, dass die beobachteten Effekte mit der Gewässertrübung in Zusammenhang stehen, die dazu führen, dass für die Kompensation der Abweichungen im Zuge der Refraktionskorrektur unrealistisch große Brechungskoeffizienten $n > 1.4$ angesetzt werden müssen. Um den vermuteten Zusammenhang mit der Trübe empirisch nachzuweisen, wurde ein Experiment unter kontrollierten Messbedingungen im Wasserbaulabor der TU Wien durchgeführt.

1 Einleitung

Die fortschreitende Entwicklung der Laserbathymetrie und der Einsatz von „Uncrewed Aerial Vehicles“ (UAV) erlaubt zunehmend höhere Auflösungen in der Aufnahme der Unterwasser-geometrie (MANDLBURGER et al. 2020). Speziell in Richtung der Strahlachse des Lasers ist dabei die Fähigkeit des Sensors Laufzeitdifferenzen präzise aufzulösen ausschlaggebend, die mittels „Light Detection and Ranging“ (LiDAR) gewonnen werden. Obwohl die Pulsdauer der dabei zum Einsatz kommenden Laser tendenziell geringer wird (typ. 1-5 ns), ist deren räumliche Ausdehnung dennoch mehr als ein halber Meter. Verschiedene Verfahren erlauben es aber, die Lage (Phase) des Pulses bis in den Subzentimeter-Bereich zu bestimmen. In diesen Verfahren werden ausgezeichnete Punkte der Pulsform, wie z.B. die Position des Maximums oder die Position der ansteigenden Flanke, identifiziert oder es kommt eine auf der gesamten Pulsform beruhende Methode wie das „Matched Filter“, eine seit langem in der Radartechnik eingesetzte Korrelationstechnik, zur Bestimmung der Pulsverzögerung zur Anwendung.

Die Ausbreitung des Lichtpulses, die als Ausbreitung einer Welle verstanden werden muss, unterliegt dabei grundsätzlich neben einer zeitlichen Verzögerung auch einer Verformung bzw. Dispersion, die durch das Trägermedium verursacht wird. Während die im vorhergehenden Absatz genannten Methoden darauf ausgelegt sind, die Verzögerung eines unverformten Pulses zu bestimmen, so besteht bei Pulsverformung ein prinzipielles Potential für systematische Fehler. Bei einer Dispersion des Pulses nun, die hier als ein rein zeitliches Phänomen verstanden wird und sich hauptsächlich in einer Verbreiterung äußert, kann erwartet werden, dass sich der

¹ RIEGL Research Forschungsgesellschaft mbH, Riedenburgstraße 48, A-3580 Horn, Österreich, E-Mail: [rschwarz, mpfennigbauer]@riegl.com

² Technische Universität Wien, Forschungsbereich Photogrammetrie, Wiedner Hauptstraße 8, A-1040 Wien, Österreich, E-Mail: [jan.rhomberg, gottfried.mandlbuerger]@geo.tuwien.ac.at, lucas.dammert@tuwien.ac.at

³ Technische Universität Wien, Forschungsbereich Wasserbau und Umwelthydraulik, Karlsplatz 13, A-1040 Wien, Österreich, E-Mail: koen.blancaert@tuwien.ac.at

Einfluss auf die genannten Methoden der Positionsbestimmung in engen Grenzen hält. Damit sollte ein Fehler bei der Bestimmung der Wassertiefe, als Ergebnis der Differenz zweier Laufzeiten, relativ unabhängig von der Tiefe selbst sein. Seit Beginn der Laserbathymetrie wird jedoch ein systematischer Bias berichtet z.B. von GUENTHER et al. (1981) mit Hilfe einer Simulationsrechnung oder als ein zur gemessenen Tiefe proportionaler Fehler (z.B. BILLARD et al. 1986) im Küstenbereich. Die letztere Fehlerart wurde aber auch bei einer Genauigkeitsuntersuchung jüngerer Datums in einem Flusslauf gefunden (MANDLBURGER et al. 2020) sowie von Mitgliedern unserer Gruppe in bislang unveröffentlichten Arbeiten beobachtet.

Ein üblicher Erklärungsansatz ist es, den längeren Weg, den ein Photon zufolge der im Wasser erfolgenden Strahlverbreiterung durchlaufen muss, für die später als bei direktem Strahlverlauf zu erwartende Eintreffzeit des Pulses vom Gewässergrund verantwortlich zu machen. Alternativ zu diesem Modell, das auf der „Radiative Transfer Equation“ (RTE) beruht (DOLIN 1997), kann ein Modell zum Einsatz kommen, das direkt auf den „Macroscopic Maxwell Equations“ (MME) beruht und die Wellennatur des Lichtes in den Vordergrund stellt (MISHCHENKO 2014). In beiden Fällen käme die Trübung des Mediums, im gegebenen Fall Wasser, als Ursache in Betracht. Im Unterschied zur RTE bietet sich mit den MME aber ein direkter Zugang zum beobachteten Phänomen über den Zusammenhang des komplexen Ausbreitungskoeffizienten mit der Partikeldichte der im Wasser eingebetteten Streuzentren (VAN DE HULST 1981). Obwohl das auf den MME basierende Modell aus theoretischer Sicht befriedigender wirkt und die RTE sogar als Korollar der MME verstanden werden kann (MISHCHENKO 2014), bleibt mit beiden Modellen eine quantitative Erklärung des beobachteten Bias als eine Folge des effektiven Brechungsindex ein Thema der aktuellen Forschung (NAHMAD-ROHEN et al. 2023).

Es steht damit die Vermutung im Raum, dass die bei Messungen im Feld gemachten Beobachtungen systematischer Tiefenabweichungen, die eine Tendenz zur Überschätzung der Wassertiefe zeigen, mit der Wassertrübung in direktem Zusammenhang stehen. Eine Berücksichtigung des Fehlers kann zwar im Rahmen der Refraktionskorrektur geschehen, würde dabei aber einen (Realteil des) Brechungsindex verlangen, der deutlich größer als 1,4 ist. Wir haben bereits früher darauf hingewiesen (SCHWARZ et al. 2020), dass eine Ursache für einen effektiven Brechungsindex größer als der konventionell angewendete Wert von $n=1.33$ in Wasser, darin besteht, dass die Gruppengeschwindigkeit von gepulstem Licht langsamer ist als die Phasengeschwindigkeit im selben Medium. Eine darüberhinausgehende, durch Trübung verursachte, distanzabhängige Pulsverzögerung ist nach unserem Kenntnisstand der Laserbathymetrie-Literatur bisher nicht systematisch untersucht worden.

In der Unterwasser-Datenübertragung mittels Laser aber, die eine systemische Verwandtschaft mit der Laserbathymetrie aufweist, finden sich Hinweise auf das vermutete Verhalten. Obwohl die absolute Signal- bzw. Pulslaufzeit für die Datenübertragung in vielen Fällen nur von untergeordneter Bedeutung ist, haben COCHENOUR et al. (2006) eine explizite Messung der absoluten Phase des Signals durchgeführt, die zeigt, dass mit zunehmender Trübung das Signal eine längere Laufzeit hat.

Da die direkte Untersuchung im Feld wegen der schwer kontrollierbaren Trübebedingungen nur mit sehr großem Aufwand denkbar ist, wurde ein Experiment unter kontrollierten Messbedingungen im Wasserbaulabor der TU Wien konzipiert.

2 Experiment: Aufbau und Auswertung

2.1 Messbecken

Für die Untersuchungen stand ein Becken (Abb. 1 C) in den Ausmaßen $5,45 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 2,2 \text{ m}$ zur Verfügung, welches für das Experiment bis zu einer Höhe von $1,817 \text{ m}$ befüllt wurde. Dies entspricht einem Volumen von ca. 30.000 l . Für die Messung wurde am Boden eine Konstruktion angebracht, welche es ermöglicht zwischen einem weißen und schwarzen Ziel zu wechseln (Abb. 1 C). Zusätzlich wurden an dieser Konstruktion Messmarken befestigt und eine GoPro Kamera in unmittelbarer Nähe positioniert, um später den Laser-Footprint am Boden aufzuzeichnen (Abb. 1 A). Für die Tiefenmessung wurde ein RIEGL VQ-840-G Lasersensor oberhalb der Konstruktion auf einer beweglichen Kranschiene angebracht, welcher während der gesamten Messung stationär fixiert blieb (Abb. 1 B).

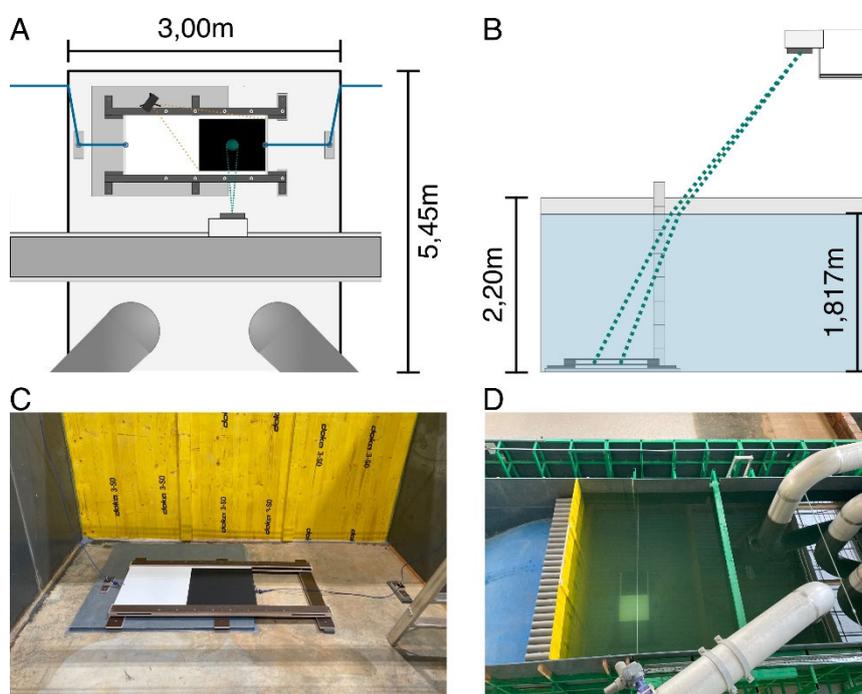


Abb. 1: (A) Illustration des Versuchsaufbaus aus der Vogelperspektive. Diese zeigt die Länge und Breite des Beckens für den Versuchsaufbau und die Konstruktion am Boden mit beweglichem Ziel. (B) Illustration des Querschnittes des Experiments mit Höhe Becken und der Höhe des Wasserstandes. Der Scanner ist hierbei nicht maßstabsgetreu eingezeichnet. (C) Fotodokumentation des beweglichen Ziels am Boden im trockenen Zustand. (D) Foto des befüllten Beckens beim Aufbau des Experimentes. Das bewegliche Ziel ist ohne zusätzliche Trübung noch sehr gut zu sehen

2.2 Trübung

Unter Trübung wird die Dämpfung des Lichtes beim Durchgang durch ein Medium verstanden, im gegenständlichen Fall Wasser, das mit Partikeln durchsetzt ist. Streng genommen handelt es sich dabei dann zwar nicht mehr um ein homogenes Medium, dennoch ist es möglich bei Annahme ausreichenden Abstands und statistischer Unabhängigkeit der Positionen der Partikel das trübe Medium als eine Gesamtheit zu betrachten. Für die Ausbreitungsverhältnisse sind die Partikelgröße (im Verhältnis zur Wellenlänge des Lichts), der Brechungsindex der Partikel und vor allem deren Anzahl von Bedeutung.

Eine auch historisch gesehen weit verbreitete Methode Trübe zu messen, besteht darin, die Sichttiefe mithilfe der sogenannten Secchi-Scheibe (ISO 7027-2 2019) festzustellen. Diese Methode ist zwar mit sehr geringem Aufwand verbunden, hängt aber nicht nur von den Umgebungsbedingungen ab, sondern hat auch eine starke subjektive Komponente. Besser vergleichbare Ergebnisse werden mit der Nephelometrischen oder der Turbidimetrischen Methode erzielt (ISO 7027-1 2016). Bei allen genannten Methoden wird implizit eine Proportionalität zur Partikeldichte angenommen, ein Zusammenhang der für den sogenannten „Single Scattering“ Fall typisch ist (VAN DE HULST 1981). Die Van de Hulst Formel gibt nun eine grundlegende Beziehung für den komplexen Brechungsindex n an:

$$n = 1 - iS(0)2\pi Nk^{-3} \quad (1)$$

i ist dabei die imaginäre Einheit $\sqrt{-1}$, k die Wellenzahl, bestimmt durch die Wellenlänge des verwendeten Lasers, $S(0)$ ist die (komplexe) Streuamplitude beim Winkel 0° in Vorwärtsrichtung und N ist die Partikeldichte. Der Imaginärteil des Brechungsindex bestimmt die Dämpfung und der Realteil die Verzögerung der Welle im Medium. Die Dämpfung ist dabei direkt proportional zu N , aber auch die Verzögerung hängt folglich mit der Partikeldichte in linearer Weise zusammen.

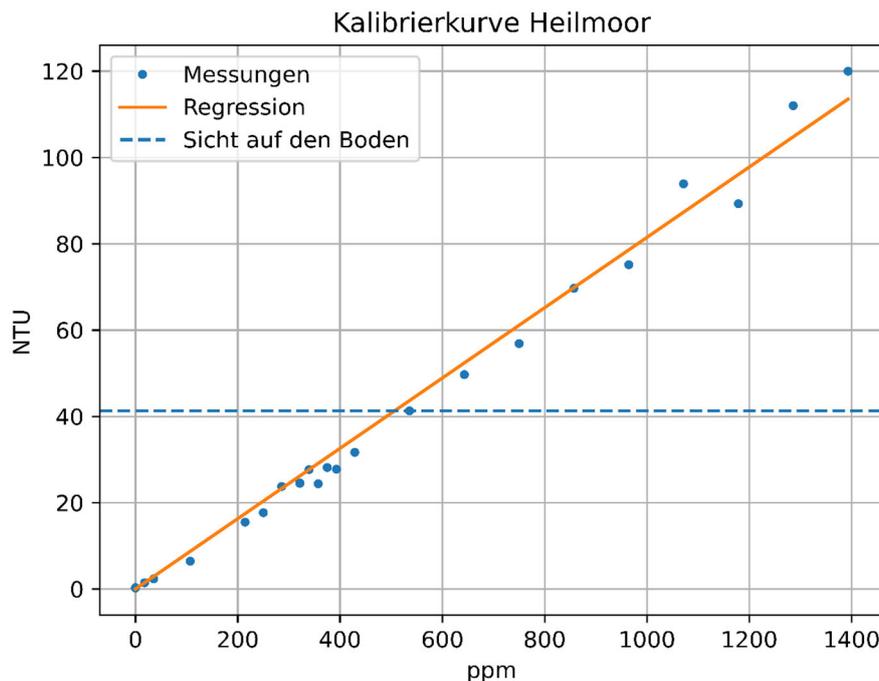


Abb. 2: Kalibrierkurve Moorbad, Punkte: Messwerte, durchgehende Linie: Regressions-gerade, strichlierte Linie: NTU Wert bei dem die Sichttiefe im Kalibrierbecken erreicht war

Der sich ergebende Freiheitsgrad, nämlich die Abhängigkeit von der Streuamplitude $S(0)$, die alleine durch das Trübungsmittel bestimmt wird, wurde nun so genutzt, dass ein Material gewählt wurde, dass sich nur sehr langsam absetzt, sodass möglichst homogene Durchmischung über einen längeren Zeitraum gewährleistet werden kann. Ausgewählt wurde schließlich ein handelsübliches Moorbad, das die gewünschten Trübungseigenschaften zeigte und von dem erwartet werden konnte, dass die Partikelgröße zumindest größer als die Wellenlänge des Lasers sein würde. Ein dabei durchaus erwünschter Nebeneffekt ist natürlich

auch die in Bezug auf die Umwelt unbedenkliche Entsorgbarkeit des Materials nach dem Experiment.

Für die Messung der Trübung kam ein Nephelometer der Type 2100Q des Herstellers Hach zum Einsatz. Das Messgerät arbeitet mit einer Wolfram-Glühfadenlampe und hat einen Messbereich von 0–1000 NTU. Der Hersteller gibt eine Präzision von 2% des Messwertes sowie eine Wiederholgenauigkeit von 1% des Messwertes an.

Vor Beginn der Messungen wurde eine für das Moorbad spezifische Kalibrierkurve ermittelt (Abb. 2). Zur Abschätzung der benötigten Mengen wurde dabei auch die Sichttiefe in einem sehr viel kleineren Kalibrierbecken ermittelt mit 41,3 NTU bei 17 cm Tiefe.

Daraus wurde ein Gesamtbedarf des Trübemittels von 2,6 l abgeschätzt unter der Annahme, dass das Experiment bis zur doppelten Sichttiefe im Hauptbecken durchgeführt werden soll und unter Zugrundelegung eines Volumens von 30.000 l.

2.3 Sensor

Für das Experiment wurde ein RIEGL VQ-840-G Laserscanner verwendet. Dieses Instrument arbeitet mit einem gepulsten Laser bei einer Wellenlänge von 532 nm und einer Pulsdauer von etwa 1,5 ns. Die Pulswiederholrate ist einstellbar zwischen 50 kHz und 200 kHz, während des Experiments wurden ausschließlich 50 kHz verwendet. Die Strahldivergenz des VQ-840-G ist in 6 Stufen von 1-6 mrad wählbar. Für das Experiment wurde 1 mrad benutzt. Das Field of View (FOV) des Empfängers ist ebenfalls in sechs Stufen zwischen 3 mrad und 18 mrad einstellbar. Bei den ersten drei Trübestufen wurde das kleinste FOV gewählt. Durch eine Fehlfunktion der Steuerung musste bei den übrigen Messungen das größte FOV verwendet werden.

Aus Sicherheitsgründen, um einen kontrollierten und konstanten Strahlengang zu haben aber auch um möglichst homogene Messbedingungen herbeizuführen, wurde der Scanmechanismus deaktiviert und das Instrument stationär betrieben. Dieser Betriebszustand steht dem Benutzer normalerweise nicht zur Verfügung und wurde mittels spezieller Firmwarebefehle freigeschaltet.

Der VQ-840-G kann für alle Messungen die Echowellenform in einem vordefinierten Entfernungsfenster aufzeichnen und zwar unabhängig davon ob von der internen Signalanalyse ein Ziel detektiert wurde oder nicht. Diese Funktionalität wurde verwendet und das Fenster so gewählt, dass Echosignale von der Wasseroberfläche und dem Beckenboden aufgezeichnet wurden.

2.4 Messablauf

Das Experiment erfolgte schließlich in 11 Zyklen unter Zugabe von je 200 ml Trübemittel pro Zyklus startend mit einer Klarwassermessung. Noch vor der eigentlichen Messreihe wurde in einem vorangehenden Durchlauf im leeren Becken ein Datensatz mit dem Lasersensor aufgezeichnet, um daraus die Laufzeit des Laserpulses in Luft entlang der Schrägdistanz zu ermitteln. Weiters wurde vor Beginn das Nephelometer für die Trübemessung mit dem zugehörigen Formazin-Standard kalibriert. Die Wassertemperatur betrug während des gesamten Experiments 22,2 °C.

Jeder Zyklus begann mit der Zugabe des Trübungsmittels, gefolgt von einer gleichmäßigen Durchmischung mit Hilfe einer Tauchpumpe. Das Abschalten der Pumpe war gefolgt von der Aufzeichnung zweier Datensätze bei bewegter Wasseroberfläche. Ein Datensatz besteht dabei aus ein bis zwei Millionen Einzelmessungen inklusive der Wellenformen. Der erste Datensatz

repräsentiert die Messung bei schwarzer Zieltafel. Der jeweils zweite Datensatz wurde nach Umstellung auf eine weiße Zieltafel aufgezeichnet. Nach einer Abklingzeit von 10 Minuten war die Wasseroberfläche soweit beruhigt, dass sie als glatt bezeichnet werden konnte. Jeweils zwei weitere Datensätze, auf schwarze und weiße Zieltafel, wurden nun in diesem Zustand aufgezeichnet. Für diese Publikation wurden jedoch nur die „glatten“ Datensätze auf die schwarze Zieltafel herangezogen. Den Abschluss eines Zyklus bildete jeweils die Kontrolle der tatsächlichen Trübung mittels Nephelometer und Secchi Scheibe.

Tab. 1: Nephelometermessungen

Menge / ml	0	200	400	600	800	1.000	1.200	1.400	1.600	1.800	2.000
NTU	2,1	2,45	3,00	3,37	4,10	4,35	4,88	5,62	6,06	6,55	6,6
Secchi / cm	-	-	-	-	-	145	127	113	107	104	97

Tab. 1 zeigt neben der gesamt zugefügten Menge des Trübungsmittels, die ebenfalls in jedem Zyklus gemessene Nephelometrische Trübung in NTU-Einheiten und die ermittelte Sichttiefe mit der Secchi Scheibe. Bei Mengen unter 1 l Trübungsmittel war Sicht bis auf den Boden des Beckens gegeben.

Bei der Durchführung des Experimentes ergaben sich folgende Abweichungen vom geplanten Ablauf. Bei der Trübungsstufe 3,37 NTU fiel die Steuerung der FOV-Einstellung des Lasersensors aus, mit der Folge, dass mit dem maximalen FOV gemessen wurde. Gepaart mit der eingestellten Laserleistung führte dies zu einer Übersteuerung des aufgezeichneten Datensatzes, was ihn für die Auswertung unbrauchbar macht. Die Fehlfunktion konnte im bestehenden Messaufbau nicht behoben werden und die Messreihe wurde daher mit geänderten Sensorparametern fortgeführt. Der höheren Empfangsleistung, zufolge größeren FOVs, wurde durch Absenken der Ausgangsleistung des Lasers entgegengewirkt, was zu akzeptablen Pegelverhältnissen der Aufzeichnung führte. Der Zyklus der fehlerhaften Messung wurde für die Auswertung nicht herangezogen.

2.5 Auswertung der Messungen

Die primären Daten, so wie sie vom Lasersensor aufgezeichnet wurden, liegen im „RIEGL Extended Packets“ (RXP) Format vor. Da der Sensor, eigentlich ein Scanner, als Distanzsensoren mit konstanter Strahlrichtung und stationärer Aufstellung betrieben wurde, war es nötig, virtuelle Trajektorien für die Verarbeitung mit der Herstellersoftware zu erzeugen. Diese Trajektorien haben zwar keine geometrische Bedeutung, ermöglichen es aber den üblichen Workflow möglichst nahe am Standardarbeitsablauf zu halten. Es wurden auf diese Weise die vom Scanner ermittelten „Online Waveform Processing“ (OWP) Punkte aus der RXP-Datei extrahiert, sowie der „Surface Volume Bottom“ (SVB) Algorithmus benutzt um die „Full-Waveform“ zu analysieren. Die gewonnenen virtuellen Punktwolken und Wellenformen liegen als „RIEGL Database“ (RDB) vor.

Abweichend vom Standardarbeitsablauf wurden die Wellenformen auch in das HDF5 Dateiformat konvertiert um daraus gemittelte Wellenformen zu erzeugen mit Hilfe des aus der Oszilloskopentechnik bekannten Verfahrens der „Equivalent Sampling Time“, deren Auflösung hier 10 ps beträgt. Diese hohe Auflösung wird ermöglicht durch den stationären Betrieb des Sensors.

Für jeden nutzbaren Messzyklus wurden aus den RDBs die über die Lichtgeschwindigkeit in Luft umgerechneten, äquivalenten Schrägdistanzen $R_{w,i}$ ermittelt und der jeweiligen Trübungsstufe gegenübergestellt.

3 Ergebnisse

Von den 11 aufgenommenen Datensätzen wurden schließlich 6 für die Untersuchung herangezogen.

Tab. 2: Unkorrigierte Schrägdistanzen zum Boden mit SVB ausgewertet

NTU	Population	Mean / m	Std / m	Median / m	MAD / m	Min / m	Max / m
2,45	3114130	10,654	0,099	10,661	0,028	9,194	13,209
3,00	2158004	10,783	0,367	10,711	0,014	8,973	13,216
4,10	4834596	11,006	0,499	10,800	0,033	8,475	14,970
4,35	2523492	11,079	0,545	10,832	0,058	8,454	13,222
4,88	1878099	11,131	0,633	10,848	0,095	8,429	13,218
5,62	1319191	11,168	0,794	10,888	0,302	8,419	13,215

In Tab. 2 sind neben Mittelwert und Standardabweichung die robusten Schätzungen Median und „Median of Absolute Deviation“ (MAD) angeführt, da die Verteilungen der Messwerte starke Ausreißer zeigen. In graphischer Form ist die Abhängigkeit der Bodendistanz von der Trübung in Abb. 3 zu sehen.

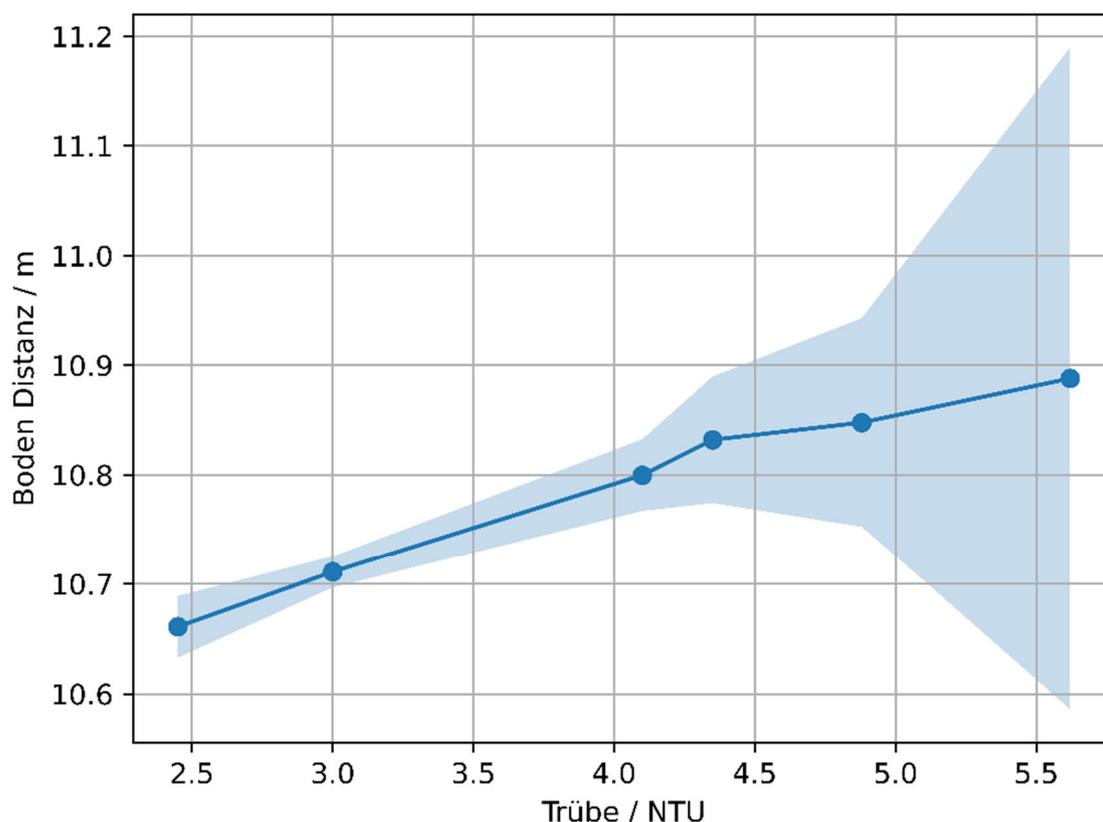


Abb. 3: Zusammenhang von Trübungsstufe und (unkorrigierter) Schrägdistanz unter Wasser. Dargestellt sind Median und MAD

4 Diskussion

Bei Annahme eines vereinfachten Modells des Empfangssignals $r(t)$, das in der Nähe des Maximums des Bodenechos annähernd gilt,

$$r(t) = e^{-\gamma t} + e^{-\gamma t_0} a(1 - b(t - t_0)^2) \quad (2)$$

wobei γ die Trübung beschreibt, t_0 den Zeitpunkt des Bodenechos und a, b die Stärke und Krümmung des Maximums beschreiben, kann man sehen, dass eine Vergrößerung der Trübung zu einem „Wandern“ des Empfangsimpulses zum Sensor führen müsste. In Abb. 4 sind drei Kurven mit unterschiedlichem γ dargestellt, wobei die Kurven zur besseren Erkennbarkeit des Effektes proportional mit $e^{-\gamma t_0}$ skaliert wurden.

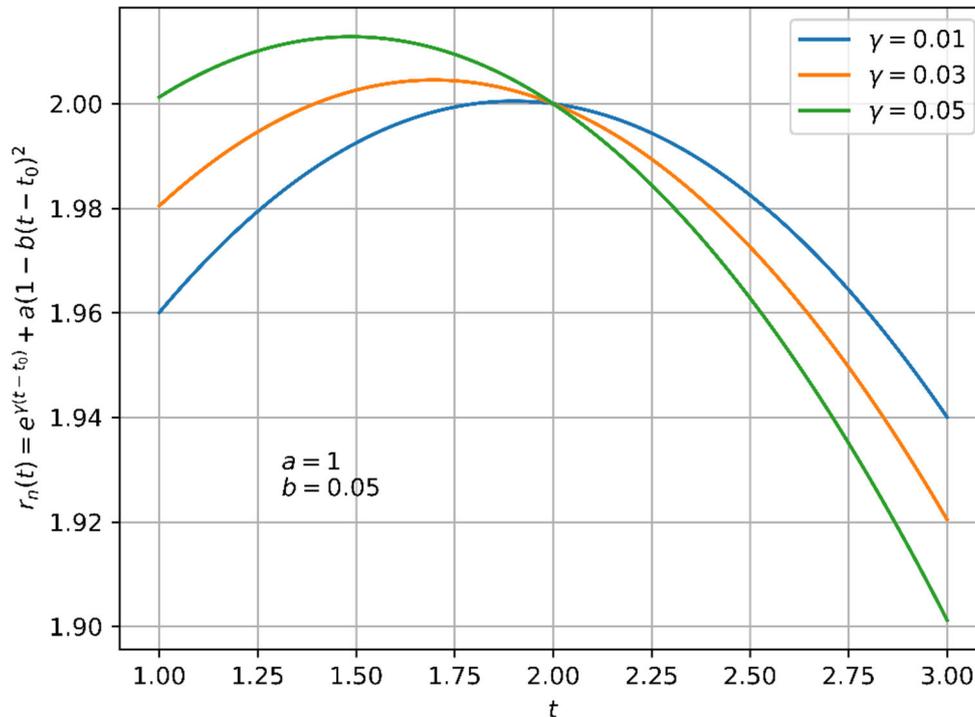


Abb. 4: Einfaches Modell des Bodenechos, die Kurven sind um die Dämpfung korrigiert um den Wanderungseffekt in Richtung Sensor zu verdeutlichen

Wie in Abb. 5 zu sehen, lässt sich der Wanderungseffekt in den hochaufgelösten Wellenformen optisch nicht nachvollziehen. Die Auswertung derselben Wellenformen mit dem SVB-Algorithmus ergibt eine Wanderung um ca. 350 ps vom Sensor weg. Diese Befundlage legt einerseits die Vermutung nahe, dass es den physikalischen Effekt der Verzögerung des Lichtpulses proportional zur Trübung, wie er gemäß Gl. (1) zu erwarten ist, zwar gibt, dass er sich aber im trüben Medium, bedingt durch die Verzerrung durch die Dämpfung gemäß Gl. (2), bloß als Kompensation der Verschiebung in Richtung Sensor manifestiert.

Da der SVB-Algorithmus auf einem wesentlich detaillierteren Modell des Sensors beruht und eine Entfaltung der Systemwellenform des Sensors vornimmt, ist es nicht unplausibel, dass die beobachtete Wanderung der gemessenen Distanzen, vom Sensor weg, real ist. Die konkrete Durchführung des Experimentes lässt aber leider keine definitive Antwort zu, da der Messaufbau zusammen mit den angewandten Messgenauigkeiten für die Beantwortung dieser Frage nicht ausreichen.

Bei den hohen Trübungsstufen 8, 9 und 10 wird das Bodenecho im Verhältnis zur, durch die Trübung verursachten, abfallenden Flanke des Empfangssignals so klein, dass auch mit dem SVB-Algorithmus kein Echo mehr zu erkennen ist, bzw. das Signal- zu Störungsverhältnis nicht mehr ausreicht für eine zuverlässige Detektion.

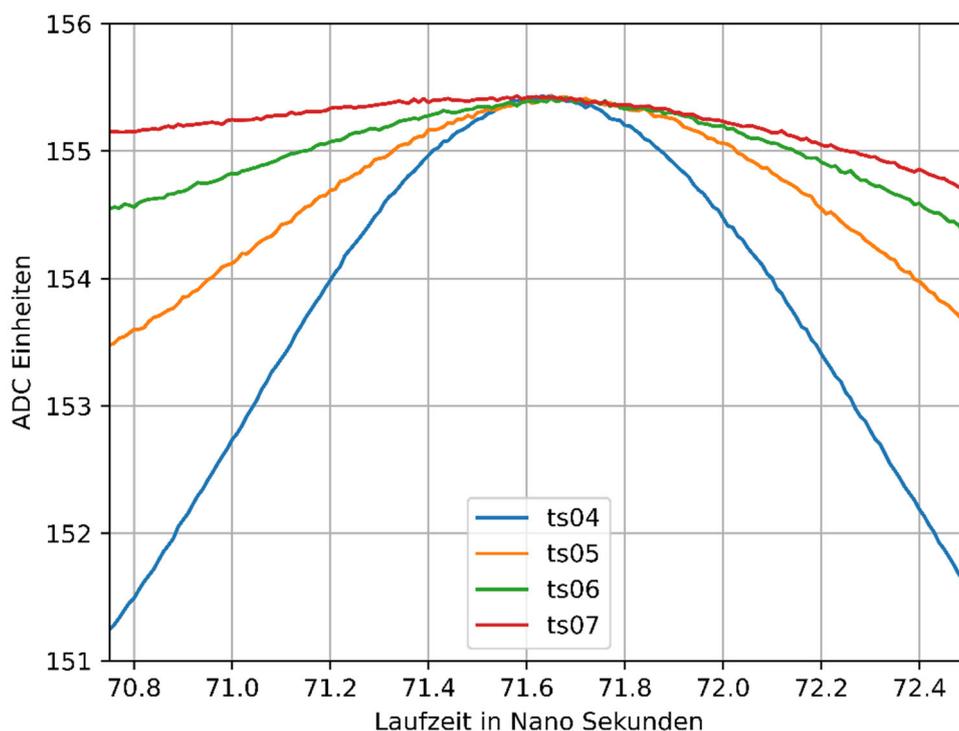


Abb. 5: Hochaufgelöste Wellenformen der Trübungsstufen 4 bis 7. Ein Wanderungsverhalten ist nicht zu erkennen

Die Klarwassermessung sowie die ersten beiden Trübungsstufen wurden mit kleinem FOV durchgeführt, während die restlichen Stufen mit dem größten zur Verfügung stehenden FOV durchgeführt werden mussten unter gleichzeitiger Reduktion der Ausgangsleistung des Lasers. Wie in Abb. 6 zu sehen, führte ein kleines FOV auf eine deutlich unterschiedliche Kurvenform, die mit dem SVB-Modell nur unzureichend modelliert werden kann – mit der Folge, dass die Wasseroberfläche wesentlich zu tief, ähnlich zu OWP-Ergebnissen, ermittelt wird. Ein großes FOV hingegen hat zu einer korrekten SVB-Wasseroberfläche geführt.

Die Klarwassermessung hat darüber hinaus eine weitere Eigentümlichkeit gezeigt, nämlich dass die Einzelpulse einer unerwartet hohen Schwankung unterworfen waren. Dies wurde von den Autoren bisher nicht beobachtet. Jedenfalls waren einzelne Echsignale so groß, dass der Linearitätsbereich des Sensors verlassen wurde und eine verlässliche SVB-Messung nicht möglich war. Der Datensatz wurde daher ausgeschieden.

Abschließend wird nochmals darauf hingewiesen, dass das im Experiment verwendete Trübemittel vermutlich eine andere Korngrößenverteilung aufweist als typische Schwebstoffe in Flüssen und stehenden Gewässern. Es konnte eine lineare Beziehung zwischen Trübe und Distanzmessung beobachtet werden, es ist aber zu erwarten wie durch Gl. (1) nahegelegt, dass die Größe der Steigung von der Korngröße des Trübemittels abhängt.

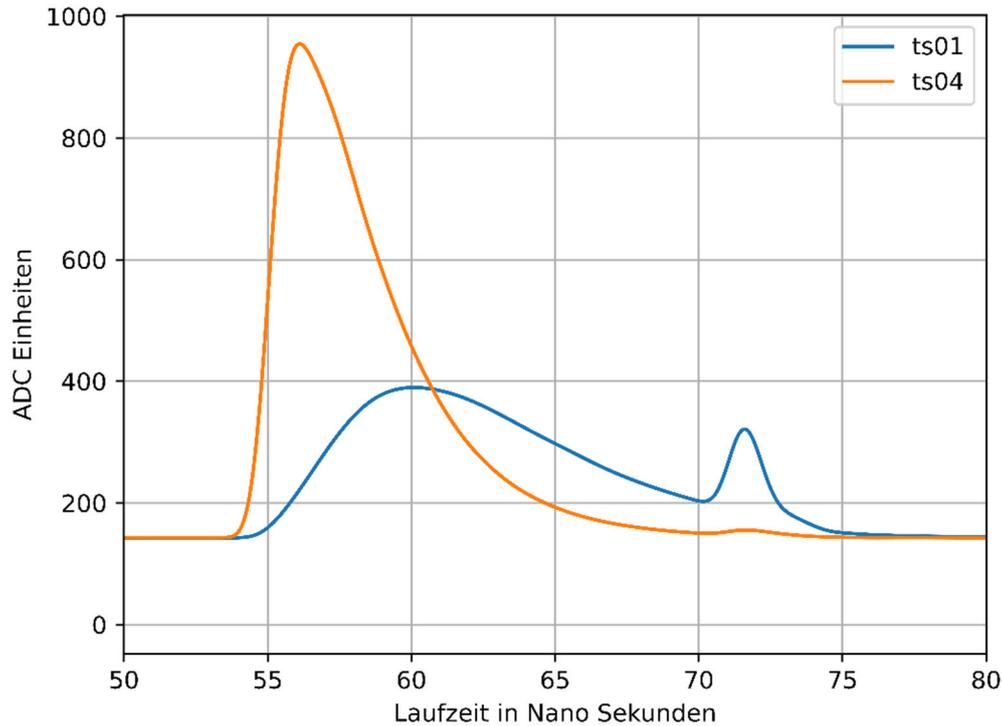


Abb. 6: Drastischer Unterschied der Kurvenformen in Abhängigkeit des FOV. ts01: kleines FOV, ts04: großes FOV

5 Fazit & Ausblick

In einem kontrollierten Experiment wurde der im Raum stehenden Vermutung nachgegangen, dass Wassertrübung systematische Fehler bei der laserbasierten Wassertiefenmessung verursacht, mit der Tendenz die Tiefe zu überschätzen. Diese bekannte Fragestellung ist unseres Wissens nach noch in keinem Experiment unter Laborbedingungen behandelt worden. Das wichtigste Fazit ist, dass bei der Wellenformauswertung mittels exponentieller Zerlegung nach dem SVB-Verfahren bei Wassertrübung tatsächlich eine proportionale Abweichung beobachtbar ist. Diese liegt in der Größenordnung von mehreren Prozent der gemessenen Tiefe. Für die Praxis ergibt sich daher die Empfehlung, die Gewässertrübe z.B. über Messung der Secchi-Tiefe oder mit dem Nephelometer bei Laserbathymetrie Kampagnen mitzuerfassen. Bei Full Waveform Aufzeichnung, welche bei bathymetrischen Scannern standardmäßig eingesetzt wird, besteht ferner die Möglichkeit, die Trübe direkt aus der Signaldämpfung abzuleiten (RICHTER et al. 2021).

In der Auswertung des Experiments sind im Weiteren Sachverhalte aufgetreten, die sowohl von theoretischem als auch von praktischem Interesse sind und die weiterführende Untersuchungen nahelegen. Das Verständnis der Abhängigkeit der Schwankungen und der Form der Empfangspulse vom FOV, vor allem im Klarwasser, könnte sich z.B. als wesentlich für eine zuverlässigere Erkennung der Wasseroberfläche erweisen. Ferner müsste für die Ableitung einer ggf. allgemein gültigen Formel für den Zusammenhang von Trübe und Abweichung der Strecken- bzw. Tiefenmessung die Strahlgeometrie präziser bestimmt werden, als dies im durchgeführten Experiment der Fall war.

Die Feststellung eines zusätzlichen Verzögerungseffekts aus der Messung der Zeitdifferenz eines Pulses zwischen seiner Aussendung und Reflexion wird im trüben und daher stark dämpfenden Medium dadurch erschwert, dass der exakte Zeitpunkt der Reflexion immer durch eine Überlagerung des Bodenechos und der Rückstreuung aus der Wassersäule verzerrt wird. Diese Tatsache legt eine Erweiterung des Experiments nahe, die auf der Messung der Durchlaufzeit in Vorwärtsrichtung alleine basiert und daher den für die Messung störenden Einfluss des Backscatters vermeidet.

6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Verantwortlichen des TU Wien Wasserbaulabors für die Möglichkeit der Durchführung des Experimentes, bei Camillo Ressler für Unterstützung bei der photogrammetrischen Auswertung sowie bei Ursula Riegl für Beratung und Organisation.

7 Literaturverzeichnis

- BILLARD, B., ABBOT, R. H. & PENNY, M. F., 1986: Modeling depth bias in an airborne laser hydrographic system. *Applied Optics*, **25**(13), 2089, <https://doi.org/10.1364/ao.25.002089>.
- COCHENOUR, B., MULLEN, L., LAUX, A. & CURRAN, T., 2006: Effects of Multiple Scattering on the Implementation of an Underwater Wireless Optical Communications Link. *OCEANS 2006*, IEEE, <https://doi.org/10.5194/10.1109/oceans.2006.306863>.
- DOLIN, L. S., 1997: Models of light pulse propagation in water and determination of inherent optical properties from parameters of the transmitted pulse. *Ocean Optics XIII*, S. G. Ackleson & R. J. Frouin, Eds., SPIE, <https://doi.org/10.5194/10.1117/12.266365>.
- GUENTHER, G. C. & THOMAS R.W.L., 1981: Error Analysis of Pulse Location Estimates for Simulated Bathymetric Lidar Returns. NOAA, Ocean Technology and Engineering Services, Rockville.
- ISO 7027-1, 2016: Water quality – Determination of turbidity – Part 1: Quantitative methods. International Organization for Standardization, Standard ISO 7027-1:2019(E).
- ISO 7027-2, 2019: Water quality – Determination of turbidity – Part 2: Semi-quantitative methods for the assessment of transparency of waters. International Organization for Standardization, Standard ISO 7027-2:2019(E).
- MANDLBURGER, G., PFENNIGBAUER, M., SCHWARZ, R., FLÖRY, S. & NUSSBAUMER, L., 2020: Concept and Performance Evaluation of a Novel UAV-Borne Topo-Bathymetric LiDAR Sensor. *Remote Sensing*, **12**(6), 986, <https://doi.org/10.5194/10.3390/rs12060986>.
- MANDLBURGER, G., PFENNIGBAUER, M. & SCHWARZ, R., 2020: Genauigkeits- und Performanceuntersuchung eines neuen bathymetrischen UAV-Laserscanners. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, **29**, 321-334.
- MISHCHENKO, M. I., 2014: Directional radiometry and radiative transfer: The convoluted path from centuries-old phenomenology to physical optics. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **146**, 4-33, <https://doi.org/10.5194/10.1016/j.jqsrt.2014.02.033>.
- NAHMAD-ROHEN, A. & GARCÍA-VALENZUELA, A., 2023: Multiple-scattering model for the effective refractive index of dense suspensions of forward-scattering particles. *J. Opt. Soc. Am. A*, **40**(8), 1552-1562, <https://doi.org/10.5194/10.48550/ARXIV.2304.10682>.

- RICHTER, K., MADER, D., WESTFELD, P. & MAAS, H.-G., 2021: Water Turbidity Estimation from Lidar Bathymetry Data by Full-waveform Analysis - Comparison of Two Approaches. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **43**(B2-2021), 681-688, <https://doi.org/10.5194/10.5194/isprs-archives-xliii-b2-2021-681-2021>.
- SCHWARZ, R., PFEIFER, N., PFENNIGBAUER, M. & MANDLBURGER, G., 2020: Depth Measurement Bias in Pulsed Airborne Laser Hydrography Induced by Chromatic Dispersion. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 1-5, <https://doi.org/10.5194/10.1109/lgrs.2020.3003088>.
- VAN DE HULST, H. C., 1981: *Light Scattering by Small Particles*. Peter Smith Pub Incorporated.