

Ein Überblick über optische Methoden in der Hydrographie

GOTTFRIED MANDLBURGER¹ & PATRICK WESTFELD²

Zusammenfassung: Die Geschichte des Einsatzes optischer Methoden für hydrographische Anwendungen reicht bis in die Mitte des letzten Jahrhunderts zurück. Seit diesen Anfängen haben sich sowohl die passiven als auch die aktiven Techniken erheblich weiterentwickelt. Mit immer neuen Sensoren und Plattformen, die zur Verfügung stehen, gibt es einen kontinuierlichen wissenschaftlichen Fortschritt im Bereich der Erfassung der Unterwassertopographie seichter Gewässer. Dieser Artikel gibt einen Überblick über die verwendeten optischen Methoden, die in passive und aktive Techniken unterteilt werden können. Zu den passiven Methoden gehören die spektrale Tiefenbestimmung sowie die Mehrmedienphotogrammetrie, die aktive Methode ist die Laserbathymetrie. Ein weiterer Ansatz zur Kategorisierung optischer Methoden basiert auf der verwendeten Trägerplattform, wobei Satelliten, bemannte Flugzeuge, unbemannte Flugsysteme und neuerdings auch ferngesteuerte Unterwasserfahrzeuge für die Kartierung von Gewässern in unterschiedlichen Maßstäben, Auflösungen und Genauigkeiten eingesetzt werden. Eine dritte Möglichkeit der Klassifizierung besteht darin, ob sich der Sensor über oder unter dem Wasserspiegel befindet. Der Beitrag beleuchtet auch die wichtigsten Datenverarbeitungstechniken, im Besonderen (i) die Refraktionskorrektur, (ii) die Signalverarbeitung des radiometrischen Inhalts und (iii) die Analyse des rückgestreuten Wellenformsignals in der Laserbathymetrie. In jüngster Zeit spielen Techniken des maschinellen Lernens nicht nur bei der Objektklassifizierung, sondern auch bei der regressionsbasierten Tiefenschätzung eine immer wichtigere Rolle. Abschließend wird auf die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten eingegangen, die von der Kartierung schiffbarer Kanäle für die sichere Schiffsnavigation über die Katastrophendokumentation, die Hochwassersimulation, den Küstenschutz, die Modellierung von ufernahen Lebensräumen, die Restrukturierung von Flüssen, die Überwachung hydromorphologischer Veränderungen, die Wartung von Wasserkraftwerken, die Kartierung von Offshore-Infrastruktur, die Kartierung von Korallenriffen bis hin zur Unterwasserarchäologie reichen. Dem Beitrag ist ein Vorwort von Patrick Westfeld, dem Leiter des Forschungs- und Entwicklungsbereichs des Referats Geodäsie, Seevermessung und Wracksuche am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), vorangestellt.

Präambel

Das vorliegende Manuskript stellt eine Kurzfassung eines open-access Überblicksartikels über optische Methoden in der Hydrographie dar, der Ende 2022 im International Hydrographic Review (IHR) erschienen ist (MANDLBURGER 2022). In der vorliegenden, gekürzten Form stellt der Beitrag

¹ TU Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, A-1040 Wien, Österreich,
E-Mail: gottfried.mandlburger@geo.tuwien.ac.at

² Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Referat Geodäsie, Seevermessung und Wracksuche,
D-18057 Rostock, Deutschland, E-Mail: patrick.westfeld@bsh.de

den Rahmen für die Bathymetrie-Plenarsitzung bei der 43. wissenschaftlich-technische Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation in München dar. Diese Sitzung besteht aus einem eingeladenen Vortrag und einer anschließenden moderierten Podiumsdiskussion mit Expert:innen aus dem Bereich Wissenschaft, Industrie und Verwaltung. Der eingeladene Vortrag wird von Dr.-Ing. Patrick Westfeld, dem Leiter des Forschungs- und Entwicklungsbereichs des Referats Geodäsie, Seevermessung und Wracksuche am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), gehalten. Von ihm stammt auch das Vorwort zu diesem Beitrag. Patrick Westfeld ist Chefredakteur des IHR, dem offiziellen Publikationsorgan der International Hydrographischen Organisation (IHO).

Die IHO ist eine zwischenstaatliche Organisation, die sich dafür einsetzt, dass alle Meere, Ozeane und schiffbaren Gewässer der Welt vermessen und kartiert werden, um insbesondere die sichere Navigation in der Schifffahrt zu gewährleisten, das Küstenzonenmanagement zu fördern, die maritime Raumordnung zu ermöglichen und die Meeresumwelt nachhaltig zu schützen.

Vorwort

Die Hydrographie liefert die Grundlagen für die nachhaltige wirtschaftliche Nutzung und den Schutz unserer Meere und Binnengewässer mit ihren Küsten und Ufern. Sie schafft die Voraussetzungen dafür, dass Schiffe sicher und effizient fahren, dass Fischerei möglich ist, dass Windparks gebaut und Kabel gelegt werden können. Hydrographische Daten sind ebenso wichtig für präzise Wasserstandsvorhersagen und den Schutz der Küsten- und Uferbereiche mit ihren Bewohnerinnen und Bewohnern. Auch sind ihre Informationen eine unverzichtbare Basis für politische und fachliche Entscheidungen für den Gewässerschutz und die damit in Zusammenhang stehende Entwicklung von Zukunftsszenarien. Das vorrangige Ziel der Hydrographie ist somit, das Wissen über unsere Gewässer zu erweitern, um sie verantwortungsvoll und sicher nutzen zu können und als Lebensraum zu schützen. Die Hydrographie ist der Schlüssel zu unseren Gewässern!

Die Hydrographie als ein Teilgebiet der Geodäsie ist eine Fachdisziplin, die im Hintergrund arbeitet und die nur wenige Fachleute kennen. Selbst für die Geodätinnen und Geodäten ist sie vielfach fremd. Deren besondere, ja strategische Bedeutung bleibt erst recht verborgen. Der Nutzen tritt eben selten unmittelbar zu Tage. Lassen Sie uns gemeinsam die gesellschaftliche und politische Aufmerksamkeit der durch die Vereinten Nationen für die Jahre 2021 bis 2030 ausgerufenen Internationalen Dekade der Meeresforschung für Nachhaltige Entwicklung (UN Ozeandekade) nutzen, um die Hydrographie und die benachbarten Fachdisziplinen Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation in den Fokus der Öffentlichkeit zu rücken. Lassen Sie uns gemeinsam zeigen, dass durch unsere interdisziplinäre Expertise die Gewässerumwelt genau und zuverlässig vermessen, fundiert analysiert und themenspezifisch visualisiert werden kann.

„The science we need for the ocean we want“ lautet das Motto der UN Ozeandekade, einer globalen Kampagne mit dem ambitionierten Ziel, wissenschaftsbasierte Lösungen für den Schutz und die nachhaltige Nutzung der Meere zu entwickeln und umzusetzen. Peter Thomson, der Sonderbeauftragte des Generalsekretärs der Vereinten Nationen für die Ozeane, erweiterte 2021 während einer Rede zu den Hundertjahrfeierlichkeiten der Internationalen Hydrographischen Organisation (IHO) dieses Motto: „The data we require, for the science we need, for the ocean we want.“ Die

durch bathymetrische Vermessung erhobenen Geobasisdaten der topografischen Gestalt von Gewässerbetten und Meeresböden bilden die notwendige Grundlage für raumbezogene Fachdaten. Sie sind folglich von fundamentaler Bedeutung, um die durch die UN Ozeandekade identifizierten Herausforderungen zu adressieren und die gesetzten Ziele zu erreichen.

Gleichzeitig betonte Thomson, wie wichtig eine enge Zusammenarbeit ist, um unsere Gewässer nachhaltig zu schützen. Im folgenden Übersichtsartikel von Gottfried Mandlbürger (TU Wien) wird auf hervorragende Weise deutlich, wie unterschiedliche Methoden, Verfahren und Systeme aus Photogrammetrie und Fernerkundung einen hydrographischen Beitrag weit über die klassische Gewässervermessung mit Echoloten hinaus leisten. Zum Einsatz kommen können zum Beispiel zur Hydroakustik komplementäre Verfahren wie Airborne Laserscanning Bathymetrie und multi-spektrale Satellitenbilddatenauswertung. Auch findet Gewässervermessung heutzutage nicht ausschließlich schiffsgestützt statt: Neben Flugzeugen und Satelliten haben unbemannt fliegende, schwimmende und tauchende Drohnen längst Einzug als Sensorträger gehalten (Abb. 1). Mandlbürger's Beitrag zeigt die vielfältigen Facetten der Hydrographie und ist ein Beleg für eine gelungene geowissenschaftliche und ingenieurpraktische Zusammenarbeit.



Abb. 1: Hydrographie – Messen mit allen Sinnen: Komplementäre Messverfahren und Sensorträgerplattformen zur bathymetrischen Datenerfassung.

1 Einleitung

Nach einer Definition der Internationalen Hydrographischen Organisation (IHO) ist die Hydrographie der Zweig der angewandten Wissenschaften, der sich mit der Messung und Beschreibung der physikalischen Eigenschaften von Ozeanen, Meeren, Küstengebieten, Seen und Flüssen sowie mit der Vorhersage ihrer zeitlichen Entwicklung befasst, und zwar zum vorrangigen Zweck der Sicherheit der Schifffahrt und zur Unterstützung aller anderen maritimen Aktivitäten, einschließlich

der wirtschaftlichen Entwicklung, der Sicherheit und Verteidigung, der wissenschaftlichen Forschung und des Umweltschutzes (IHO 2022). In diesem Zusammenhang wird auch der Begriff Bathymetrie verwendet. Beide Wörter stammen aus dem Griechischen, und während Hydrographie übersetzt „Wasser beschreiben“ bedeutet, bedeutet Bathymetrie „Tiefenmessung“. Bathymetrie ist also ein spezifischerer Begriff, aber beide können austauschbar im Sinne der Kartierung der Unterwassergeometrie verwendet werden.

Die genaue Kenntnis der Form und Veränderung der Unterwassertopographie und der Objekte ist die Grundlage für eine Vielzahl von sozioökonomischen und ökologischen Themen. Zu den ersten gehören die Sicherheit der Schifffahrt, die Bewertung des Hochwasserrisikos, die Planung von Gefahrenzonen und Schutzmaßnahmen. Zu den letzteren zählen die Wiederherstellung von Küsten- und Schwemmlandgebieten, die Überwachung ihres Zustands und ihrer Veränderungen sowie die Bewertung der jeweiligen Auswirkungen auf die aquatischen Lebensräume (Hydrobiologie, Lebensraummodellierung auf Mikro- und Mesoebene usw.).

Optische Methoden eignen sich gut für die Erfassung der Bathymetrie von klaren und flachen Küsten- und Binnengewässern mit Tiefen <60 m aus der Luft, sind aber für tiefere Gewässer aufgrund der hohen Lichtabsorption im Wasser ungeeignet. Befindet sich die Trägerplattform unter Wasser, können optische Verfahren auch zur Kartierung des Meeresbodens und natürlicher oder künstlicher Objekte in der Tiefsee eingesetzt werden, sofern die Messdistanz gering ist. Hydroakustische Methoden (Sound Navigation And Ranging, SONAR) sind die erste Wahl für mittlere Wassertiefen von 20–500 m (LURTON 2010). Während SONAR-Systeme auch für Vermessung großer Wassertiefen eingesetzt werden kann, bieten Satellitengravimetrie und -altimetrie globale Abdeckung von Tiefseegebieten (SANDWELL et al. 2014) mit einer räumlichen Auflösung im km-Bereich.

Im Flachwasserbereich besteht eine Überschneidung zwischen optischen Methoden und SONAR. SONAR übertrifft die optischen Methoden in Bezug auf die maximale Messtiefe. Die luftgestützte Erfassung mit optischen Methoden hat jedoch zwei Vorteile: (i) das effektive SONAR-Gesichtsfeld (engl. Field of View, FoV) verringert sich mit abnehmender Wassertiefe, während die Schwadbreite bei der Datenerfassung aus der Luft hauptsächlich von der Flughöhe und nur in geringem Maße von der Wassertiefe abhängt und (ii) für die schiffsgebundenen SONAR-Sensoren ist eine Mindestwassertiefe für den sicheren Betrieb erforderlich. Darüber hinaus bieten optische Methoden aus der Luft eine nahtlose Abdeckung vom Meeresboden über den Uferbereich bis zum trockenen ufernahen Bereich (GUENTHER et al. 2000; SCHWARZ et al. 2019; YANG et al. 2022).

Für hydrographische Vermessungen mittels optischer Fernerkundung haben sich folgende Methoden durchgesetzt: (i) radiometrische Tiefenbestimmung auf der Grundlage von Multispektralbildern (engl., Spectrally Derived Bathymetry, SDB), (ii) Mehrmedienphotogrammetrie auf der Grundlage von Stereobildern und (iii) luftgestützte Laserbathymetrie (engl. Airborne Laser Bathymetry, ALB). Während die ersten beiden Methoden passiv sind und die vom Boden des Gewässers zurückgestreute Sonnenstrahlung zur Tiefenmessung nutzen, ist ALB eine aktive Methode, die auf

Laufzeitmessung (engl. Time-of-Flight, ToF) eines gepulsten grünen Lasers basiert. zeigt eine schematische Darstellung der drei wichtigsten optischen Methoden in der Hydrographie.

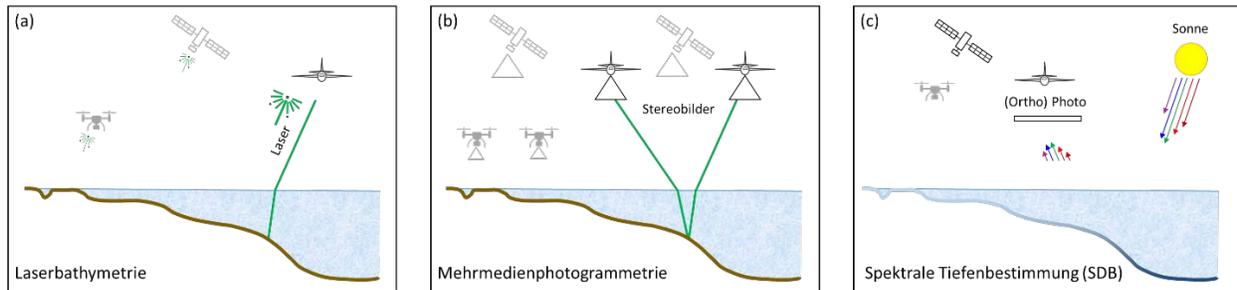


Abb. 2: Schematische Darstellung optischer Methoden in der Hydrographie: (a) Laserbathymetrie, (b) Mehrmedienphotogrammetrie, (c) spektrale Tiefenbestimmung. Alle drei Methoden können von Satelliten, bemannten und unbemannten Flugzeugen und auch unter Wasser eingesetzt werden.

Eine wegweisende Arbeit über Mehrmedienphotogrammetrie stammt aus dem Jahr 1948 (RINNER 1948). Die ersten Anwendungen des Lasers, der in den 1960er Jahren erfunden wurde, waren das Auffinden von Unterseebooten (SORENSEN et al. 1966) und die Kartierung der küstennahen Unterwassertopographie (HICKMAN & HOGG 1969). Nicht viel später beschrieben POICYN et al. (1970) multispektrale Ansätze zur Ableitung der Wassertiefe aus Satellitenbildern. Alle bekannten passiven und aktiven Methoden der optischen Hydrographie wurden also vor 1970 eingeführt, so dass die Wissenschaft auf Erkenntnisse aus 50 Jahren Forschung und Entwicklung aufbauen kann. Auch die Entwicklung von immer neuen Sensoren, Plattformen und Verarbeitungsstrategien treibt das Feld weiter voran. Dies zeigt sich deutlich an der steigenden Zahl von Veröffentlichungen in den letzten Jahren. Die Ergebnisse einer bibliografischen Abfrage in Scopus mit den Stichwörtern *spectrally derived bathymetry*, *multimedia photogrammetry* und *laser bathymetry* (einschließlich verwandter Begriffe) sind in Abb. 3 dargestellt.

Die kleine Spitze am Anfang der Zeitachse im Jahr 1982 ergibt sich aus der Zusammenfassung früherer Beiträge am Beginn der Grafik. Darüber hinaus ist aus Abb. 3a deutlich zu erkennen, dass bis etwa zum Jahr 2000 weniger als 20 Veröffentlichungen pro Jahr zu verzeichnen waren. Ab dem Jahr 2010 ist ein kontinuierlicher Anstieg zu verzeichnen. Interessant ist dabei, dass in der Anfangszeit (vor 1982) mehr Veröffentlichungen zum Thema Mehrmedienphotogrammetrie überwiegen, was höchst wahrscheinlich an der früheren Verfügbarkeit von photographischen (Stereo)-Kameras im Vergleich zu Multispektralsatelliten und bathymetrischen Laserscannern liegt. Für SDB ist anzumerken, dass Landsat Level-1-Multispektralbilder sowie Level-2- und Level-3-Wissenschaftsprodukte seit 2008 kostenlos aus dem Archiv des U.S. Geological Survey (USGS) heruntergeladen werden können, was ab 2010 zu einem kontinuierlichen Anstieg der SDB-bezogenen Publikationen führte (vgl. Abb. 3b). Bei der Laserbathymetrie ist aus Abb. 3d im Jahr 2011 eine Spitze zu erkennen, die auf das Aufkommen von topo-bathymetrischen Laserscannern zurückzuführen ist, die eine hohe räumliche Auflösung für Flachwassergebiete bieten.

Die auffälligen Spitzen in den Jahren 2014 und 2019 in den Abb. 3c und 3d können auf die zunehmende Verfügbarkeit von UAV-gestützten Bildsensoren zurückgeführt werden. Die stimulierende Wirkung von UAVs als Trägerplattformen ist ein allgemeiner Trend für photogrammetrische Kar-

tierung und 3D-Objektrekonstruktion (COLOMINA & MOLINA 2014). In Bezug auf hydrographische Anwendungen ist festzustellen, dass auch hier der Aufschwung bei der Mehrmedienphotogrammetrie früher einsetzte, da die Kameras leichter sind und es länger dauerte, kompakte und leichte Scanner zu entwickeln. Die hohe Zahl der Veröffentlichungen unterstreicht jedenfalls die Bedeutung der aktuellen Forschung, insbesondere vor dem Hintergrund des Klimawandels und seiner Auswirkungen, wie der Zunahme von Hochwasserkatastrophen einerseits und zunehmender Wasserknappheit und Dürren andererseits (KREIBICH et al. 2022).

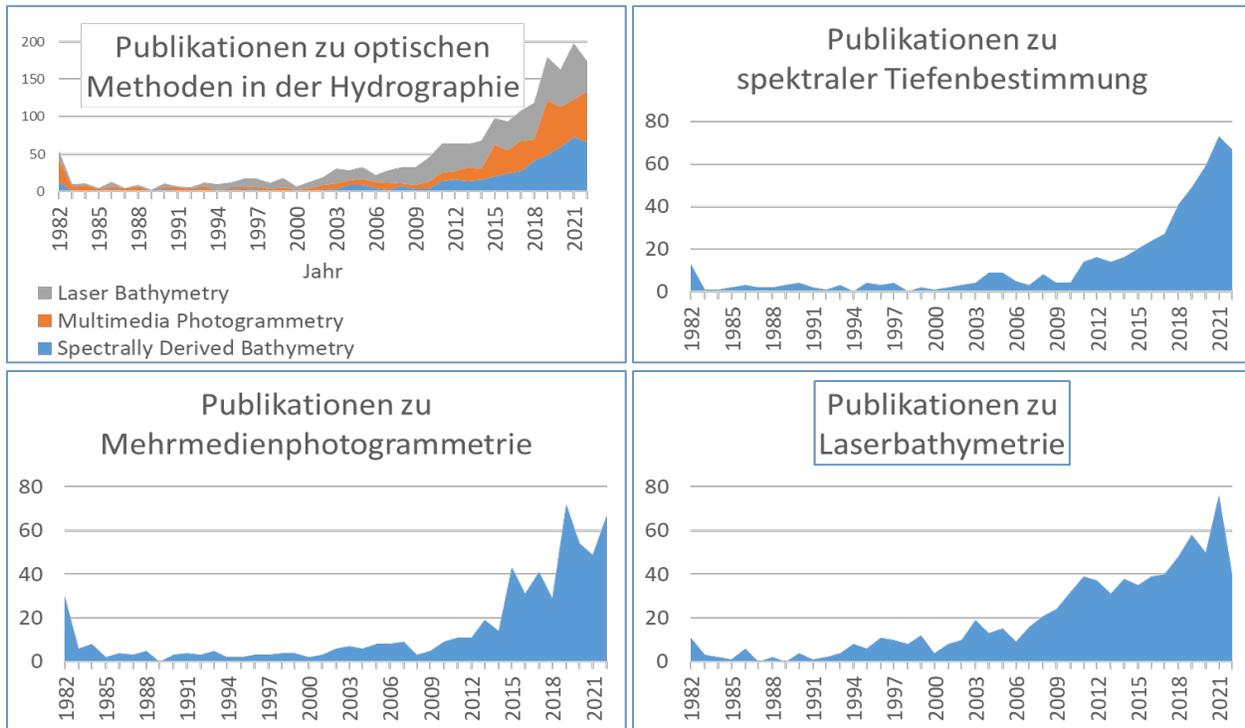


Abb. 3: Entwicklung der Veröffentlichungen im Zusammenhang mit optischen Methoden in der Hydrographie; Ergebnisse einer bibliographischen Abfrage in der Zitationsdatenbank Scopus.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über Methoden, Sensoren, Plattformen und Anwendungen optischer Messtechniken für die hydrographische Kartierung mit Schwerpunkt auf luftgestützter Erfassung. Der Artikel ist wie folgt aufgebaut: Im ersten Teil werden in Abschnitt 2 (SDB), Abschnitt 3 (Photobathymetrie) und Abschnitt 4 (Laserbathymetrie) die Prinzipien der drei wichtigsten optischen Methoden vorgestellt. Der zweite Teil des Artikels befasst sich in Abschnitt 5 mit Sensoren und Plattformen und stellt in Abschnitt 6 ausgewählte Anwendungen vor. Der Artikel endet mit einer Zusammenfassung und abschließenden Bemerkungen in Abschnitt 7.

2 Spektrale Tiefenbestimmung

Bei der spektral abgeleiteten Bathymetrie (SDB) wird eine Beziehung zwischen dem radiometrischen Bildinhalt und der Wassertiefe hergestellt (POICYN et al. 1970; LYZENGA 1978). Voraussetzung dafür ist ein umfassendes Verständnis der komplexen Wechselwirkung der Sonnenstrahlung mit der Atmosphäre, der Wasseroberfläche, dem Wasserkörper und schließlich dem Boden des

Wasserkörpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ . Zur Ableitung der Bathymetrie aus dem radiometrischen Bildinhalt werden entweder physikalisch- oder regressionsbasierte Ansätze verwendet. Letzteres erfordert unabhängige Referenzdaten, um Modelle zu trainieren, welche die Beziehung zwischen Farbe und Tiefe beschreiben.

Grundlage ist in jedem Fall ein multispektrales Bild. Die gesamte am Bildsensor ankommende Strahlendichte kann als Summe der einzelnen Teilbeiträge geschrieben werden (LEGLEITER et al. 2009):

$$L_T(\lambda) = L_B(\lambda) + L_C(\lambda) + L_S(\lambda) + L_P(\lambda) \quad (1)$$

Die auf den Sensor einfallende Gesamtstrahlung L_T setzt sich aus der vom Gewässerboden reflektierten Strahlung L_B , der vom Gewässer bzw. der Wassersäule zurückgestreuten Strahlung L_C , der Signalkomponente aus Reflexionen an der Wasseroberfläche L_S und Komponenten aus rückstreuenden Partikeln in der Atmosphäre L_P zusammen. Die Signaldämpfung in der Wassersäule ist exponentiell, was auf die kontinuierliche Vorwärts- und Rückwärtsstreuung sowie auf die Absorption von Licht im Medium Wasser zurückzuführen ist. Der Signalbeitrag L_B vom Boden hängt sowohl von der Wassertiefe als auch von den Bodeneigenschaften (Reflexionsgrad, Rauheit) ab. Die spektralen Unterschiede des Bodens spielen allerdings nur in sehr flachem Wasser eine große Rolle, da in tieferem Wasser die Dämpfung durch die Wassersäule überwiegt (POPE & FRY 1997). Der Beitrag der Wassersäule L_C wird durch die optischen Eigenschaften des Wassers bestimmt. Wesentlicher Faktor dabei ist die Trübung durch Schwebstoffe und organische Stoffe (GROBELAAR 2009). Der Term L_S beschreibt die Signalantwort von der Wasseroberfläche. Ein großer Beitrag von der Oberfläche ist dann zu erwarten, wenn das Sonnenlicht durch spiegelnde Reflexion direkt in das Sichtfeld eines Sensorpixels einfällt. L_P schließlich repräsentiert die von der Atmosphäre in das Sichtfeld des Sensors zurückgestreute Strahlungsdichte.

Für Bilder, die optisch tiefes Wasser enthalten (kein messbares Bodensignal) kann eine einfache physikalische Beziehung zwischen Wassertiefe und Rückstreustärke formuliert werden (LYZENGA et al. 2006):

$$L(d) = L_S + L_B e^{-\alpha d} \quad (2)$$

$L(d)$ ist die am Sensor empfangene Strahlung nach Korrektur um die Atmosphäre und etwaige Glanzlichter. Der Term L_S umfasst sowohl die Reflexionen von der Wasseroberfläche als auch die Rückstreuung aus einer unendlich tiefen Wassersäule. L_B beschreibt in erster Linie das Reflexionsvermögen des Bodens, berücksichtigt aber auch Transmissionsverluste durch die Luft-Wasser-Grenzfläche und Effekte der Volumenstreuung im Wasserkörper. Der Exponentialkoeffizient α ist der effektive Dämpfungskoeffizient und setzt sich aus der Summe von vorwärts und rückwärts gestreuten Lichtkomponenten zusammen. Gleichung 2 zeigt den exponentiellen Signalabfall in Abhängigkeit von der Wassertiefe d und dem Wassergehalt. Durch Entlogarithmieren kann eine lineare Beziehung zwischen der Wassertiefe und dem radiometrischen Bildinhalt hergestellt werden.

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

Unter der Annahme, dass sowohl die Wasserverhältnisse als auch der Untergrund homogen sind, kann die Tiefe d also bereits aus einem einzigen spektralen Bildkanal bestimmt werden, ohne dass externe Referenzdaten vorhanden sind.

Der in Gleichung 3 formulierte Ansatz setzt homogene Reflektivität des Untergrunds voraus. Eine Methode, bei der Reflexionsunterschiede des Gewässerbettes teilweise kompensiert werden können, stammt von STUMPF et al. (2003). Dabei wird das Verhältnis von zwei Spektralbändern mit unterschiedlicher Wellenlänge berechnet, welches sich bei empirischen Untersuchungen als annähernd konstant erwies. Bei Multispektralbildern stehen in der Regel mehr als zwei Bänder zur Verfügung, sodass aus allen verfügbaren, wasserdurchdringenden Bändern die optimale Bandkombination ermittelt werden kann. Ein derartiges Verfahren wurde unter dem Namen Optimum Band Ratio Analysis (OBRA) von LEGLEITER et al. (2009) vorgestellt. Dabei ergibt sich eine aus dem Bild abgeleitete Größe X :

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

die annähernd linear mit der Wassertiefe d verbunden ist. Die empirische Beziehung zwischen X und d wird schließlich durch Regression von Referenztiefen aus Feldmessungen gegen X ermittelt. Ist der Gewässerboden komplex, reichen einfache Modelle basierend auf logarithmisch transformierten Bandenverhältnissen nicht mehr aus. Zusätzlich zu den oben erwähnten etablierten physikalischen und regressionsbasierten Tiefeninversionsmethoden haben daher in den vergangenen Jahren Ansätze des maschinellen Lernens (ML) für SDB zunehmend an Bedeutung gewonnen (AL NAJAR et al. 2021). Eine große Bedeutung kommt dabei speziell Convolutional Neural Networks (CNN) zugute, die sich aufgrund der Fähigkeit von Faltungen, beliebige Funktionen zu approximieren, als wirksame Werkzeuge für die spektrale Tiefenbestimmung erwiesen haben (ZHOU 2020).

3 Mehrmedienphotogrammetrie

Bei der Mehrmedienphotogrammetrie handelt es sich um eine rein geometrische Methode, deren Grundlagen auf die Mitte des 20. Jahrhunderts zurückgehen (RINNER 1948). Befindet sich der Sensor in der Luft oder am Boden und sind die zu vermessenden Objekte und Oberflächen untergetaucht, so ergibt sich ein Zwei-Medien-Problem. In der aktuellen Literatur wird die stereobildbasierte Erfassung der Unterwassertopografie für Fließgewässer (DIETRICH 2016) und für Küstengebiete diskutiert basierend auf Stereobildern, die mit Drohnen, bemannten Flugzeugen und Satelliten erfasst werden (HODÜL et al. 2018; CAO et al. 2019; AGRAFIOTIS et al. 2020).

Aufbauend auf dem Grundkonzept der Photogrammetrie (FÖRSTNER & WROBEL 2016) kann die Unterwassertopographie aus Stereobildern abgeleitet werden, sofern die innere und äußere Orientierung der Bilder bekannt ist (MULSOW 2010) und die Wasseroberfläche mit ausreichender Genauigkeit rekonstruiert werden kann. Sobald die innere und äußere Orientierung der Bilder aufgelöst ist und homologe Punkte des Wasserbodens in mindestens zwei Bildern identifiziert werden

$$\frac{\sin \alpha_a}{\sin \alpha_w} = \frac{n_w}{n_a} = \frac{v_a}{v_w}$$

können, muss der scheinbare Schnittpunkt der entsprechenden Bildstrahlen noch um die Brechung an der Wasseroberfläche korrigiert werden (LUHMANN et al. 2019). Die Grundlage hierfür ist das Snellius'sche Brechungsgesetz:

Gleichung 5 zeigt, dass der Sinus der luft- und wasserseitigen Bildstrahlen (α_a und α_w) umgekehrt proportional zu den jeweiligen Brechungsindizes in Wasser ($n_w \approx 1,33$) und Luft ($n_a \approx 1,00$) und direkt proportional zu den Ausbreitungsgeschwindigkeiten sind ($v_a \approx 300,000$ km/s, $v_w \approx 225,564$ km/s). Abb. b veranschaulicht die Strahlbrechung. Die scheinbaren Bildpunkte, die sich aus dem geradlinigen Schnittpunkt der Bildstrahlen ergeben, sind tendenziell zu hoch und müssen durch Anwendung der Brechungskorrektur nach unten korrigiert werden. Ausführliche Beschreibungen der Refraktionskorrektur sind in KOTOWSKI (1988) und MURASE et al. (2008) zu finden. In Bezug auf die Bündelblockausgleichung beschreibt MAAS (2015) ein rigoroses geometrisches Korrekturmodell für den Multimediafall, das generisch genug ist, um als Grundlage für die Integration in Standard-Software für die photogrammetrische Bündelblockausgleichung zu dienen. In MAAS (2015) wird auch das Genauigkeitspotenzial der Mehrmedienphotogrammetrie erörtert und der Einfluss der Netzgeometrie, der Rauigkeit der Wasseroberfläche, der Schwankungen des Brechungsindex sowie von Dispersions- und Diffusionseffekten unter Wasser hervorgehoben, die unter relativ günstigen Bedingungen zu einer Verschlechterung der Genauigkeit um etwa einen Faktor zwei führen.

Für die Ableitung von 3D Punktwolken werden heutzutage Ansätze der merkmalsbasierten, flächenbasierten oder dichten Bildzuordnung eingesetzt. Im Bereich der dichten Bildzuordnung ist die Erzeugung von topographischen 3D-Punktwolken ausgereift. Offene Forschungsfragen gibt es dagegen noch in der Photobathymetrie (MANDLBURGER 2019). Dies gilt insbesondere für nicht statische Wasseroberflächen. Während bei topographischen Anwendungen eine Hinzunahme Stereobildpartnern i. d. R. die Genauigkeit der resultierenden Punktwolke erhöht, kann die richtungsabhängige Bildstrahlbrechung in der Photobathymetrie auch zu einer Verschlechterung der Ergebnisse führen. Das Problem der unterschiedlichen Refraktioneffekte für jede Punkt/Kamera-Kombination in einer Structure-from-Motion Punktwolke wird in DIETRICH (2016) behandelt. Der Autor stellt eine Multikamera-Refraktionskorrektur vor und berichtet von einer Genauigkeit in der Größenordnung von 0,1 % der Flughöhe, d. h. 4 cm bei einer Flughöhe von 40 m über Grund.

4 Laserbathymetrie

Im Gegensatz zu den in den Abschnitten 2 und 3 beschriebenen passiven Methoden handelt es sich bei der Laserbathymetrie um eine aktive Technik zur Kartierung flacher Gewässer unter Verwendung eines gepulsten grünen Lasers (PHILPOT 2019). Dabei wird die Entfernung zwischen Sensor und Ziel durch Messung der Umlaufzeit eines sehr kurzen Laserpulses (Wellenlänge $\lambda = 532$ nm, Pulsdauer $\Delta t = 1\text{--}10$ ns) durch Luft und Wasser bestimmt (GUENTHER et al. 2000). Nach dem Durchgang durch die Atmosphäre wird der ein Teil der Laserstrahlung an der Wasseroberfläche reflektiert, und der restliche Teil dringt in das Wasser ein. Beim Eintritt in die Wassersäule ändert der Laserstrahl in Abhängigkeit von den optischen Eigenschaften des Wassers sowohl seine Richtung als auch seine Ausbreitungsgeschwindigkeit gemäß dem Snellius'schen Brechungsgesetz (vgl. Gleichung 5, $v_w \approx v_L/1,33 \approx 225,564$ km/s). Aufgrund der geringeren Lichtgeschwindigkeit

im Wasser erscheinen die unkorrigierten 3D-Unterwassermesspunkte im Gegensatz zur Mehrmedienphotogrammetrie zu tief und müssen entsprechend nach oben korrigiert werden.

In der Wassersäule wird die Laserstrahlung durch kontinuierliche Strahlbrechung und Signalabsorption abgeschwächt, so dass nach der Reflexion des Laserpulses am Boden und dem entsprechenden Rückweg nur noch ein kleiner Teil der Laserenergie am Sensor ankommt. Daher verwenden alle bathymetrischen Sensoren sehr empfindliche Detektoren (MANDLBURGER 2020). Die allgemeine Beziehung zwischen gesendeter und empfangener Energie wird durch die Laser-Radar-Gleichung (WAGNER 2010) beschrieben, die für bathymetrische Anwendungen in die Signalkomponenten der Wasseroberfläche, der Wassersäule, des Gewässerbodens und der Hintergrundstrahlung einschließlich der Verluste in der Atmosphäre unterteilt wird (ABDALLAH et al. 2012).

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

Gleichung 6 hat die gleiche Form wie Gleichung 1. Die Signalverluste in der Laserbathymetrie entsprechen somit denen, die bereits in Abschnitt 2 für die spektrale Tiefenbestimmung beschrieben wurden. Dies gilt auch für die exponentielle Abschwächung in der Wassersäule. Ein wesentlicher Vorteil der Laserbathymetrie besteht darin, dass die Signaldämpfung, die in der Regel durch den effektiven Dämpfungskoeffizienten k beschrieben wird, anhand der asymmetrischen Form der aufgezeichneten Wellenformen geschätzt werden kann (RICHTER et al. 2017; SCHWARZ et al. 2017). Es besteht eine direkte Beziehung zwischen k und der Secchi-Tiefe sd ($sd \approx 1,6/k$). Die Secchi-Tiefe ist ein empirisches Maß für die Wassertrübung und bezeichnet den Abstand, ab dem die schwarzen und weißen Quadranten einer Scheibe von 20 cm Durchmesser, die von einem Boot an einem Seil ins Wasser gelassen wird, nicht mehr voneinander unterschieden werden können (EFFLER 1988). Die Hersteller von bathymetrischen Sensoren beschreiben die Leistung der Tiefenmessung in der Regel in Vielfachen der Secchi-Tiefe (MANDLBURGER 2020).

Die Erkennung der Wasseroberfläche ist eine Voraussetzung für eine präzise Brechung und Laufzeitkorrektur der Rohmessungen. Die meisten bathymetrischen Scanner betreiben zu diesem Zweck einen zusätzlichen Nahinfrarot-Kanal ($\lambda = 1,064$ nm) zusammen mit dem grünen Laser, da die Signalabsorption im Wasser für Strahlung im nahen Infrarot (NIR) sehr hoch ist und NIR-Laserpulse daher nur minimal in die Wassersäule eindringen (GUENTHER et al. 2000). Wenn kein NIR-Kanal vorhanden ist, muss die Luft-Wasser-Grenzfläche allein anhand der Reflexionen des grünen Kanals modelliert werden. Da in diesem Fall die Echos von der Wasseroberfläche oft eine Mischung aus direkter Reflexion und Volumenstreuung in den ersten cm der Wassersäule darstellen (GUENTHER et al. 2000), sind spezielle Auswerte- und Modellierungsmethoden erforderlich. Insbesondere bei topo-bathymetrischen Scannern mit kleinem Laserfootprint müssen die Nicht-Planarität und die Dynamik der Wasseroberfläche (Wellen) berücksichtigt werden, um präzise 3D-Punktkoordinaten des Wasserbodens zu erhalten (WESTFELD et al. 2017).

Messunsicherheit, Ungenauigkeiten der Wasseroberfläche und des Refraktionskoeffizienten, tragen gemeinsam mit der Sensororientierung und -kalibrierung zum gesamten Fehlerbudget der Laserbathymetrie bei. Unter Anwendung der rigorosen Fehlerfortpflanzung veröffentlichten EREN et al. (2019) ein Modell zur Schätzung der vertikalen Gesamtunsicherheit (engl. Total Vertical Uncertainty, TVU) von bathymetrischem LiDAR.

Die meisten bathymetrischen Laserscanner arbeiten nach dem Prinzip der Laufzeitmessung. Vor allem für Unterwasseranwendungen im Nahbereich ist die Laserlichtschnitt-Triangulation eine Alternative zum ToF-Scanning. Bei der Lasertriangulation in der Hydrographie wird eine grüne Laserlinie auf das Objekt projiziert und die beleuchtete Linie bzw. Kurve wird von einer Kamera erfasst, die an einem festen Standort in Bezug zum Laserprojektor montiert ist (SARDEMANN et al. 2022). Das Abbildungssystem ist in einem wasserdichten Gehäuse installiert und die Sensoren müssen schräg im Gehäuse angebracht werden, um nahezu orthogonale Strahlenschnittwinkel zu erhalten. Um präzise 3D-Objektkoordinaten zu erhalten, müssen Brechungseffekte an der Luft-Glas-Grenzfläche im Inneren und an der Glas-Wasser-Grenzfläche außerhalb des Gehäuses berücksichtigt werden. Einer der Hauptvorteile gegenüber der ToF-basierten Laserbathymetrie ist, dass hochpräzise Unterwassermessungen zu wesentlich geringeren Kosten durchgeführt werden können. In der jüngeren Vergangenheit wurden verschiedene Implementierungen von bathymetrischen Scannern beschrieben, die auf dem Prinzip der Lichtblatt-Triangulation basieren (BLEIER et al. 2019), die alle eine Genauigkeit von weniger als einem Millimeter für einen begrenzten Tiefenbereich von weniger als 50 cm aufweisen.

5 Sensoren und Plattformen

Optische hydrographische Methoden werden sowohl auf globaler als auch auf lokaler Ebene eingesetzt. Der Messbereich variiert von 800 km bis zu wenigen Zentimetern. Die verwendeten Sensorplattformen werden entweder von weltraumgestützten, bemannten oder unbemannten luftgestützten, terrestrischen oder Unterwasserplattformen aus betrieben. Im Unterwasserbereich werden die Sensoren entweder von Tauchern, ferngesteuerten Fahrzeugen (ROV) oder autonomen Unterwasserfahrzeugen (AUV) getragen. Ein Überblick über die in der optischen Hydrographie verwendeten Plattformen und Skalen findet sich in CHEMISKY et al. (2021).

5.1 Weltraumgestützte Sensoren

Auf globaler Ebene sind multispektrale Satellitenbilder die wichtigste Quelle für die Erstellung hydrografischer Karten der Flachwasserzone. Diese werden sowohl für die weltraumgestützte Mehrmedienphotogrammetrie als auch für spektrale Tiefenbestimmung eingesetzt. Neben den Spektralkanälen bieten die meisten Sensoren auch einen panchromatischen Kanal mit höherer räumlicher Auflösung an. Die Pan-Kanäle sind für Photobathymetrie von Vorteil, liefern aber im Allgemeinen keine zusätzlichen Informationen für SDB. Die Spektralbänder umfassen in der Regel einen wasserdurchlässigen Coast Blue Kanal im ultravioletten Bereich des Spektrums ($\lambda \approx 440$ nm), mehrere sichtbare Kanäle (blau, grün, rot, roter Rand) sowie Kanäle im nahen Infrarot (NIR), im kurzwelligen Infrarot (SWIR) und im thermischen Infrarot (TIR). Für die Ableitung hydrographischer Produkte bilden die NIR-Kanäle die Grundlage für die Korrektur des Sonnenlichts. Die sichtbaren Kanäle werden für die Ableitung der Bathymetrie verwendet (LYZENGA et al. 2006). Für die Mehrmedienphotogrammetrie werden Stereobilder benötigt, was die Auswahl an möglichen Satelliten einschränkt (z. B. WorldView, Pleiades, Terra/ASTER). Dennoch ist auch hier in den letzten Jahren ein gesteigertes Interesse zu beobachten, da diese rein geometrische Technik

voraussetzungsfrei ist und keine externen Referenzdaten benötigt. Anwendungen sind z. B. in HO-DÜL et al. (2018) beschrieben.

Während die Ableitung hydrographischer Produkte von weltraumgestützten Plattformen lange Zeit auf passive Bilder beschränkt war, hat sich diese Situation mit der Einführung von ICESat und seinem Nachfolger ICESat-2 (NEUMANN et al. 2019) grundlegend geändert. Der Satellit ist mit einem einzelphotonsensitiven Laserprofilier ausgestattet (Advanced Topographic Laser Altimeter System, ATLAS), der mit grüner Laserstrahlung ($\lambda = 532 \text{ nm}$) arbeitet und damit neben seiner Hauptanwendung, der Erfassung der Kryosphäre der Erde, auch ideal für bathymetrische Zwecke geeignet ist. Obwohl ATLAS keine flächendeckende Flachwasserabdeckung mit hoher räumlicher Auflösung bietet, ergänzt der Sensor die bestehenden multispektralen Instrumente, indem er für jeden Laserpuls zuverlässige Unterwasser-Referenztopographie liefert. Dies ist besonders nützlich für Deep-Learning-basierte SDB-Ansätze, die eine große Menge an Trainingsdaten erfordern.

5.2 Luftgestützte Sensoren

Die klassische Anwendung der optischen Hydrographie erfolgt von bemannten Flugzeugen aus. Alle in den Abschnitten 2–4 besprochenen Erfassungsmethoden werden von bemannten Flugplattformen aus eingesetzt. Jede metrische Kamera, die üblicherweise für topographische Anwendungen und die Erstellung von Orthofotos verwendet wird, kann auch für die Ableitung hydrographischer Produkte verwendet werden. Dies gilt insbesondere für photogrammetrische Kameras, die neben den sichtbaren Kanälen auch einen NIR-Kanal bieten. Luftgestützte Laser-Bathymetrie-Sensoren können unterteilt werden in (i) tiefe bathymetrische Sensoren, (ii) flache topo-bathymetrische Sensoren und (iii) Mehrzweck-Sensoren. Bathymetrische Tiefensensoren zielen ab auf eine Maximierung der Eindringtiefe. Sie verwenden Laser mit einer relativ langen Pulsdauer von ca. 7 ns und einer niedrigen Messrate von 3–10 kHz, um eine hohe Pulsenergie von ca. 7 mJ zu erreichen. Um Sicherheitsvorschriften für Augensicherheit zu erfüllen, ist die Strahldivergenz solcher Sensoren groß (7 mrad), was bei einem Betrieb in 500 m Höhe zu einem Durchmesser der Laser-aufstandsfläche von 3–4 m führt. Die hohe Eindringtiefe von typischerweise 3 sd wird also mit einer mäßigen räumlichen Auflösung erkauft.

Bei den so genannten topo-bathymetrischen Sensoren liegt der Schwerpunkt auf einer höheren räumlichen Auflösung zur Erfassung von flachen Binnen- und Küstengewässern mit hoher Reliefenergie (Felsen, Geröll, plötzliche Hangänderungen usw.). Sie verwenden kurze und schmale Laserstrahlen (Pulsdauer: 1–2 ns, Strahldivergenz: 0,7–2 mrad) und höhere Pulswiederholraten von bis zu 700 kHz, was zu Laserabdruckdurchmessern von 0,5–1 m am Boden und einer Punktdichte von etwa 25 Punkten/m² in einem einzigen Flugstreifen führt. Die kurze Pulslänge ermöglicht die Trennung der Laserrückstrahlung von Wasseroberfläche und Boden auch bei sehr flachen Tiefzonen mit Wassertiefen unter 20 cm und damit einen nahtlosen Übergang zwischen Wasser und Land. Andererseits haben kurze Pulslängen auch eine geringere Pulsenergie und damit eine geringere Eindringtiefe von typischerweise 1,5 sd zur Folge.

Zusätzlich zu den Laserscannern enthalten die modernen Laserbathymetriescanner auch RGB- oder RGBI-Kameras. Die Bilder werden hauptsächlich zur Fotodokumentation oder als Datengrundlage für die Einfärbung von Punktwolken verwendet, aber der Einsatz von

hochauflösenden metrischen Kameras (z. B. RCD30, PhaseOne IXU usw.) eröffnet auch die Möglichkeit, neben der Laservermessung Bathymetrie auch mit Hilfe der Photogrammetrie sowie über spektrale Tiefenbestimmung abzuleiten. Für mehr Details sowie eine Liste verfügbarer Sensoren sei auf MANDLBURGER (2022) verwiesen.

5.3 UAV-gestützte Sensoren

Bis vor wenigen Jahren konnten bathymetrische Laserscanner aufgrund ihres hohen Gewichts nur von bemannten Plattformen (Flugzeuge, Hubschrauber, Tragschrauber) aus betrieben werden. Mit der fortschreitenden Miniaturisierung der Sensoren und Fortschritten bei der Entwicklung von unbemannten Flugplattformen können kompakte Laserscanner nun auch auf Starrflüglern und Multirotor-UAV integriert werden. Drohnen werden in der Regel aus einer niedrigen Flughöhe von etwa 50–120 m über dem Boden und mit einer moderaten Fluggeschwindigkeit von 4–10 m/s betrieben, was im Vergleich zum Betrieb von bemannten Flugplattformen in größerer Höhe eine deutlich kleinere Laserfläche sowie eine höhere Punktdichte und damit eine höhere räumliche Auflösung zur Folge hat. Außerdem ist die Signaldämpfung in der Atmosphäre aufgrund des kürzeren Messbereichs deutlich geringer und es steht effektiv mehr Signalstärke zur Verfügung, um in den Wasserkörper einzudringen. Dies gilt insbesondere für UAV-gestützte bathymetrische Lasersensoren, spielt aber auch bei der bildgestützten Bathymetrie eine Rolle.

Da leichte Kameras lange vor dem Aufkommen kompakter Laserscanner zur Verfügung standen, wurde der Einsatz von UAV-Kameras für photogrammetrische Kartierungen im Allgemeinen und hydrographische Anwendungen im Besonderen früher entwickelt als die UAV-gestützte Laserbathymetrie (DIETRICH, 2016). Wie bereits in Abschnitt 5.2 erwähnt, sind alle Kameras, die für die Kartierung der Topographie geeignet sind, auch für die Hydrographie geeignet. Während High-End-Kamerasysteme, die neben dem sichtbaren RGB-Kanal auch einen IR-Kanal enthalten, häufig für bemannte Plattformen in der Luft verfügbar sind, ist dies bei UAV-Bildern selten der Fall. Die aktuelle Forschung zeigt jedoch, dass RGB-Bilder eine geeignete Grundlage sowohl für die Medienphotogrammetrie als auch für SDB sind (siehe MANDLBURGER 2022).

In jüngster Zeit hat das Aufkommen von bathymetrischen Laserscannern, die in UAVs mit einer maximalen Startmasse (MTOM) von weniger als 35 kg integriert sind, einen weiteren großen Sprung im Bereich der luftgestützten Laserbathymetrie in Bezug auf die räumliche Auflösung und die Tiefenleistung bewirkt. So wie die Einführung von topo-bathymetrischen Scannern für flache Gewässer zusätzlich zu den traditionellen Tiefwassersensoren die räumliche Auflösung erhöht hat, haben UAV-basierte topo-bathymetrische Scanner die erreichbare Punktdichte um eine weitere Größenordnung gesteigert. Der Durchmesser der Laserfootprints moderner UAV-gestützter bathymetrischer Scanner liegt im sub-dm-Bereich, und zusammen mit Punktdichten in der Größenordnung von 100–200 Punkten/m² ermöglicht dies nicht nur die Kartierung der Unterwassertopographie mit hohem Detailierungsgrad, sondern auch die Erfassung und Modellierung von Unterwasservegetation und strömungsrelevante Mikrostrukturen wie z. B. kleinen Felsbrocken. Eine Liste verfügbarer Sensoren ist in MANDLBURGER (2022) enthalten.

5.4 Unterwasser-Sensoren

Obwohl sich der Artikel hauptsächlich auf optische hydrographische Methoden konzentriert, bei denen sich der Sensor oberhalb des Wasserspiegels befindet, seien hier auch kurz Unterwassersensoren und -plattformen diskutiert. Generell lassen sich vier verschiedene Szenarien unterscheiden, die in Abb. 4 schematisch dargestellt sind: (a) das Schiff oder Boot schwimmt auf der Wasseroberfläche und die Bildsensoren (Kameras und/oder Laserscanner) befinden sich auf der Unterseite des Schiffes in einem wasserdichten Gehäuse, (b) ein Taucher bedient manuell eine einzelne Kamera oder ein Stereokamera-Rig, (c) die Bildsensoren sind auf einem ferngesteuerten Fahrzeug (ROV) mit einer drahtgebundenen Kommunikationsverbindung integriert und (d) die Bildsensoren sind auf einem autonomen Unterwasserfahrzeug (AUV) installiert.

In jedem Fall ist der Abstand zwischen Sensor und Ziel relativ gering, was die Abbildung von Objekten in sehr hoher räumlicher Auflösung ermöglicht, aber zusätzliche Herausforderungen für die Sensororientierung mit sich bringt. Außer für den Fall des schwimmenden Schiffes befindet sich nicht nur der Sensor, sondern auch die Plattform vollständig unter Wasser, so dass GNSS für die Positionierung des Sensors nicht verfügbar ist. Wenn kein GNSS zur Verfügung steht, wird die Bildorientierung entweder über Passpunkte (MAAS 2015), visuelle Odometrie (BOTELHO et al. 2010) oder Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)-Verfahren (BARKBY et al. 2009) erreicht. Der Einsatz von ROVs für Unterwasserinspektionen wird immer häufiger für die Kartierung und Überwachung von Offshore-Anlagen und Wasserkraftwerken eingesetzt. Neben ROVs entwickeln sich auch völlig autonom operierende Unterwasserfahrzeuge rasch. Sie werden bereits für die Kartierung großer Bereiche des Meeresbodens in Tiefen von mehreren tausend Metern eingesetzt. In einem ersten Überblick beschreibt BELLINGHAM (2009) die Funktionsweise und Navigation von AUV-Plattformen. Neben den hydroakustischen Sensoren sind in AUVs auch optische Bildsensoren wie Laser und Stereokameras integriert, aber die Anwendung wird unter anderem durch das Fehlen von Licht und durch Einschränkungen hinsichtlich des Energieverbrauchs behindert. Trotz dieser Schwierigkeiten wurden Kameras bereits erfolgreich für eine hochauflösende und großflächige Kartierung des Tiefseebodens eingesetzt (KWASNITSCHKA et al. 2016). Neben der Stereophotogrammetrie wird auch Laserscanning unter Wasser eingesetzt. Aus Gründen der Augensicherheit werden Scanner vorwiegend in ROVs und AUVs integriert. Unterwasser-Laserscanner arbeiten mit (i) dem ToF-Messprinzip auf der Basis von gepulsten grünen Lasern, (ii) Triangulation auf der Basis von strukturiertem Licht und (iii) Frequenzmodulation. Einen ausführlicheren Überblick zum Thema Unterwasser-Laserscanning geben FILISETTI et al. (2018) und MASSOT-CAMPOS & OLIVER-CODINA (2015).

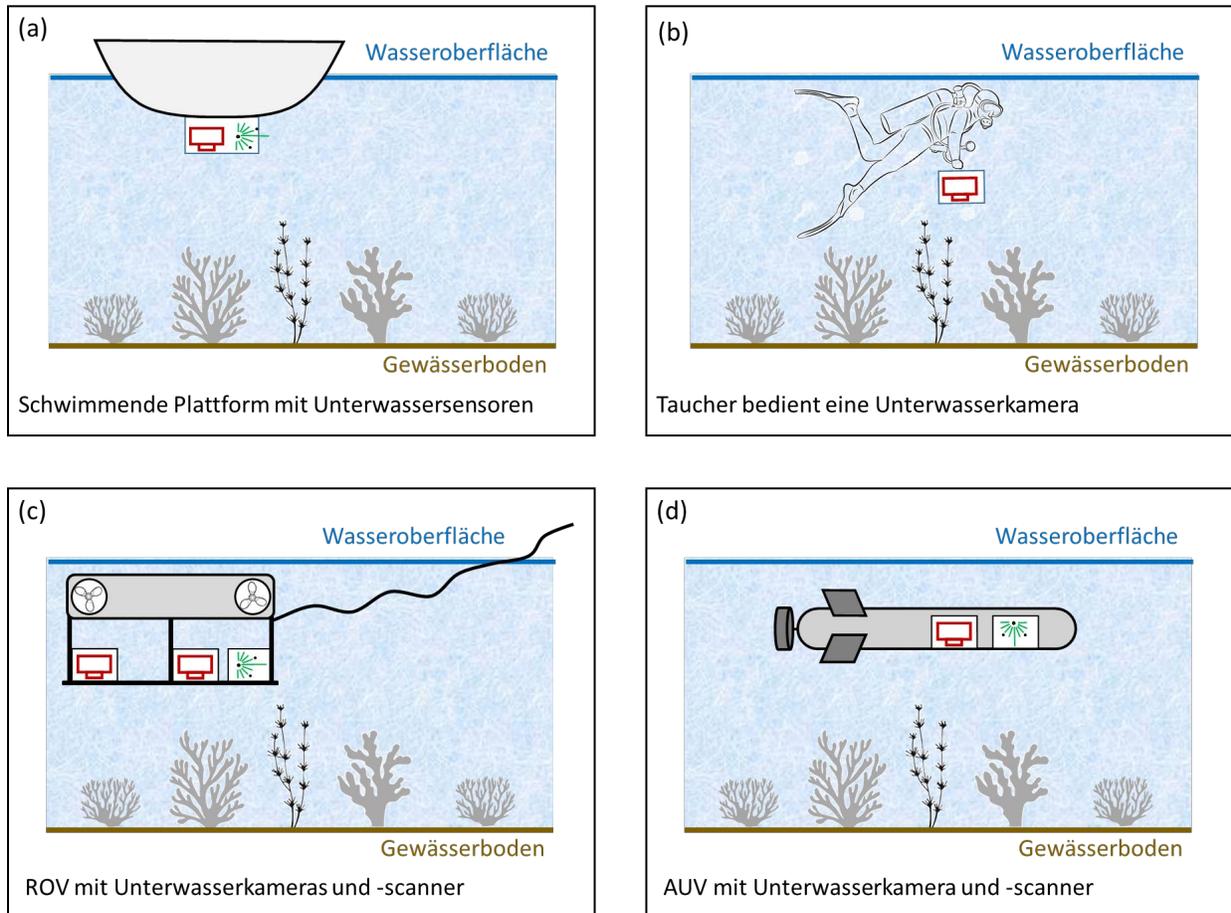


Abb. 4: Schematische Darstellung der Unterwassersensoren: (a) schwimmendes Schiff, (b) Taucher, (c) ferngesteuertes Unterwasserfahrzeug, (d) autonomes Unterwasserfahrzeug.

6 Anwendungen

Die Anwendungen von SDB, Photo- und Laserbathymetrie sind vielfältig, und aufgrund der enormen Fortschritte in der Sensor- und Plattformtechnologie entstehen laufend weitere Anwendungsszenarien. Insbesondere die Miniaturisierung der Sensoren und die Einführung von ferngesteuerten oder autonom operierenden Plattformen eröffnen neue Möglichkeiten für die Kartierung, Inspektion, Überwachung und Dokumentation von Unterwassertopographie, Artefakten und Infrastruktur. Es würde den Rahmen dieses Beitrags sprengen, auf alle Anwendungsbereiche einzugehen, im Folgenden werden daher lediglich beispielhafte Anwendungsfälle besprochen. Für eine ausführlichere Besprechung sei auch hier wieder auf [MANDLBURGER \(2022\)](#) verwiesen.

Optische Methoden eignen sich gut für die großflächige Kartierung von Flachwassergebieten mit moderaten Tiefen kleiner 60 m. Die effektivste Technik für großflächige Kartierungen ist die satellitengestützte spektrale Tiefenbestimmung. Ein globaler Ansatz wurde z. B. in [ALMAR et al. \(2021\)](#) veröffentlicht. Die Autoren behaupten darin, dass der Meeresboden bis zu einer Tiefe von 100 m erfasst und dabei die meisten Kontinentalschelfbereiche mit einer Fläche von 4.9 Mio. km²

kartiert werden konnten. Während die Tiefengenauigkeit von 6–9 m mäßig ist, ist die globale Abdeckung von besonderem Interesse für Länder, die nicht die Möglichkeit haben, In-situ-Messungen durchzuführen. Neben der SDB kann auch die luftgestützte Laserbathymetrie mit bemannten Flugzeugen eine großflächige Abdeckung mit einer viel höheren vertikalen Genauigkeit bieten, die den strengen IHO-Normen entspricht (IHO 2020). Die weite Verbreitung von bathymetrischem LiDAR wird durch die Verfügbarkeit von (offenen) Datenarchiven dokumentiert, die z. B. von der NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) in den USA verwaltet und gepflegt werden (NOAA 2022).

Durch den Anstieg des Meeresspiegels sind viele archäologische Stätten über die Jahrhunderte überflutet worden. Dies gilt insbesondere für die römische Epoche, deren Spuren im Mittelmeer zu finden sind. Für die 3D-Rekonstruktion von Unterwasserstrukturen ist eine relativ hohe räumliche Auflösung erforderlich, weshalb topo-bathymetrisches LiDAR und multimediale Stereophotogrammetrie die bevorzugten Techniken sind. Wenn eine höhere räumliche Auflösung als die dm-Ebene erforderlich ist, ist die Unterwasserphotogrammetrie die Methode der Wahl (DRAP 2012). Interessant ist in diesem Kontext auch die Fusion von photogrammetrischen Datensätzen über und unter der Wasseroberfläche, die in NOCERINO & MENNA (2020) anhand eines prominenten Beispiels, dem Costa Concordia Schiffswrack, beschrieben wurde.

Da mehr als 200 Millionen Menschen an Küsten leben, die weniger als 5 m über dem Meeresspiegel liegen, besteht ein offensichtlicher Bedarf für die Kartierung von Küstengebieten mit dem Schwerpunkt auf dem Schutz dieser empfindlichen Übergangszone zwischen Meer und Land. Wenn globale Abdeckung und häufige Aktualisierungen wichtiger sind als eine hohe räumliche Auflösung, ist SDB die Methode der Wahl. Bei höheren Ansprüchen an Auflösung und Genauigkeit ist Laserbathymetrie weit verbreitet. Einige Länder haben bereits Erfassungsprogramme für den Küstenschutz und die Küstenüberwachung mit regelmäßigen Aktualisierungszyklen eingeführt, z. B. Schleswig-Holstein in Deutschland (CHRISTIANSSEN 2021). In den U.S.A. wird die Überwachung von Küstenveränderungen seit Jahrzehnten mit dem Compact Hydrography Airborne Rapid Total Survey (CHARTS) Programm durchgeführt, bei dem bathymetrische und topographische Laserscanner sowie Luftbildkameras zum Einsatz kommen (MACON 2009).

Mit der Zunahme von Offshore-Installationen (Öl und Gas, Windturbinen usw.) wird die Inspektion, Kartierung und Überwachung von Unterwasser-Infrastrukturen immer wichtiger. Das gilt auch für Wasserkraftwerke. Um die zu Anlagen zu erfassen, werden sowohl ROVs als auch AUVs eingesetzt (CAPOCCI et al. 2017). Dabei wird Nahbereichsphotogrammetrie üblicherweise für die präzise Kartierung von Unterwasserinfrastruktur eingesetzt (CHEMISKY et al. 2021). Neben Stereokameras werden jedoch auch verschiedene Arten von Laserscannern eingesetzt (FILISSETTI et al. 2018; MASSOT-CAMPOS & OLIVER-CODINA 2015). Im Allgemeinen sind für die Inspektion und Überwachung von Infrastrukturen je nach Anwendung unterschiedliche Ansätze erforderlich, da manchmal eine sehr hohe Präzision im Sub-mm-Bereich erforderlich ist, um beispielsweise die Form einer Turbinenschaufel zu überprüfen, während es in anderen Fällen vielleicht nur notwendig ist, das Vorhandensein eines Hindernisses zu überprüfen (d. h. ein Bild oder eine Bildsequenz zu klassifizieren).

7 Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde einen Überblick über optische Methoden in der Hydrographie gegeben und die eingesetzten Sensoren, Plattformen und typischen Anwendungen diskutiert. Die etablierten Methoden sind (i) spektrale Tiefenbestimmung, (ii) Mehrmedienphotogrammetrie und (iii) Laserbathymetrie. Alle drei Methoden können von weltraumgestützten, bemannten und unbemannten luftgestützten sowie Unterwasserplattformen aus betrieben werden.

Die spektrale Methode wird überwiegend auf der Grundlage von multispektralen Satellitenbildern verwendet, die den Vorteil haben, dass sie eine globale Abdeckung bieten. Für diese Methode sind externe Referenzdaten zur Kalibrierung der physikalischen oder regressionsbasierten Modelle erforderlich. Heute ersetzen Techniken des maschinellen Lernens zunehmend die traditionellen Methoden.

Das von Pilot:innen gesteuerte Flugzeug ist die bevorzugte Plattform für die Laserbathymetrie. Diese aktive Fernerkundungstechnik bietet eine gute Tiefenmessperformance von etwa der dreifachen Secchi-Tiefe, eine effiziente Flächenleistung mit dem Vorteil, dass die Schwadbreite nicht von der Wassertiefe, sondern nur von der Flughöhe abhängt, und einer sehr guten Positions- und Höhengenaugigkeit, die auch den strengen Spezifikationen der Internationalen Hydrographischen Organisation entspricht. Letzteres gilt insbesondere für die Flachwasserkanäle moderner topobathymetrischer Laserscanner, die eine hohe räumliche Auflösung im Submeterbereich und eine Tiefengenaugigkeit im dm-Bereich zum Preis einer reduzierten Tiefenleistung bieten. Dank der Fortschritte in der Sensor- und Plattformtechnologie können bathymetrische Laserscanner nun auf unbemannten Trägerplattformen integriert werden und bieten eine räumliche Auflösung und Genauigkeit im Submillimeterbereich.

Die Mehrmedienphotogrammetrie hingegen wird meist in der Unterwasservermessung eingesetzt, d. h. sowohl die Objekte als auch der Sensor befinden sich unter der Wasseroberfläche. Die Sensoren sind dabei in wasserdichten Gehäusen, die entweder flach oder kugelförmig sind. Von allen optischen Methoden hat die Mehrmedienphotogrammetrie die längste Geschichte, die auf eine wegweisende Arbeit aus 1948 zurückgeht. Heute wird die methodische Entwicklung von der Computer Vision vorangetrieben, was zur Einführung von Structure from Motion (SfM) und Dense Image Matching (DIM) in der Stereophotogrammetrie im Allgemeinen und der Mehrmedienphotogrammetrie im Besonderen geführt hat.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass optische Methoden eine effiziente Alternative zu herkömmlichen hydroakustischen Untersuchungen in flachen Gewässern darstellen. Beide Techniken ergänzen sich im Hinblick auf ihre jeweiligen Anwendungsbereiche. Für die Zukunft der optischen Methoden in der Hydrographie ist absehbar, dass kontinuierliche Fortschritte in der Sensor- und Plattformtechnologie einerseits und Fortschritte in den Verarbeitungsmethoden und der Computerleistung andererseits die Qualität der abgeleiteten Produkte weiter verbessern und auch neue Forschungsfelder erschließen werden. Insbesondere in Zeiten des Klimawandels werden multitemporale Analysen eine immer größere Rolle spielen. Dies ist für weltraumgestützte Daten mit entsprechenden Datenarchiven bereits gut etabliert, muss aber auf lokale hochauflösende Daten von luftgestützten, UAV-gestützten und Unterwasserplattformen ausgeweitet werden.

8 Literaturverzeichnis

- ABDALLAH, H., BAGHDADI, N., BAILLY, J.-S., PASTOL, Y. & FABRE, F., 2012: Wa-LiD: A New LiDAR Simulator for Waters. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters Geosci. Remote Sensing Lett.*, **9**(4), 744-748, <http://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2011.2180506>.
- AGRAFIOTIS, P., KARANTZALOS, K., GEORGOPOULOS, A. & SKARLATOS, D., 2020: Correcting Image Refraction: Towards Accurate Aerial Image-Based Bathymetry Mapping in Shallow Waters. *Remote Sensing*, **12**(2), <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/2/322>.
- AL NAJAR, M., THOUMYRE, G., BERGSMAN, E. W. J., ALMAR, R., BENSHILA, R. & WILSON, D. G., 2021: Satellite derived bathymetry using deep learning. *Machine Learning*, <https://doi.org/10.1007/s10994-021-05977-w>.
- ALEVIZOS, E., OIKONOMOU, D., ARGYRIOU, A. V. & ALEXAKIS, D. D., 2022: Fusion of Drone-Based RGB and Multi-Spectral Imagery for Shallow Water Bathymetry Inversion. *Remote Sensing*, **14**(5), <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/5/1127>.
- ALMAR, R., BERGSMAN, E. W. J., THOUMYRE, G., BABA, M. W., CESBRON, G., DALY, C., GARLAN, T. & LIFERMANN, A., 2021: Global Satellite-Based Coastal Bathymetry from Waves. *Remote Sensing*, **13**(22), <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/22/4628>.
- BARKBY, S., WILLIAMS, S., PIZARRO, O. & JAKUBA, M., 2009: An efficient approach to bathymetric slam. 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 219-224.
- BELLINGHAM, J., 2009: Platforms: Autonomous underwater vehicles. J. H. Steele (ed.), *Encyclopedia of Ocean Sciences* (2nd Edition). Academic Press, Oxford, 473- 484, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012374473900730X>.
- BLEIER, M., VAN DER LUCHT, J. & NÜCHTER, A., 2019: Scout3d – an underwater laser scanning system for mobile mapping. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **42**(2/W18), 13-18, <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-2-W18/13/2019/>.
- BOTELHO, S., OLIVEIRA, G., DREWS, P., FIGUEIREDO, M. & HAFEFLE, C., 2010: Visual odometry and mapping for underwater autonomous vehicles. H. Yussuf (ed.), *Robot Localization and Map Building*. IntechOpen, Rijeka, Chapter 19, <https://doi.org/10.5772/9274>.
- CAO, B., FANG, Y., JIANG, Z., GAO, L. & HU, H., 2019: Shallow water bathymetry from WorldView-2 stereo imagery using two-media photogrammetry. *European Journal of Remote Sensing*, **52**(1), 506-521, <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1658542>.
- CHRISTIANSEN, L., 2021: Laser bathymetry for coastal protection in Schleswig-holstein. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, **89**(2), 183-189, <https://doi.org/10.1007/s41064-021-00149-w>.
- COLOMINA, I. & MOLINA, P., 2014: Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **92**, 79-97, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271614000501>.
- DEWI, R. S., SOFIAN, I. & SUPRAJAKA, 2022: The application of satellite derived bathymetry for coastline mapping. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **950**(1), 012088. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/950/1/012088>.

- DIETRICH, J. T., 2016: Bathymetric Structure-from-Motion: extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, **42**(2), 355-364, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/esp.4060>.
- DRAP, P., 2012: Underwater photogrammetry for archaeology. D. C. da Silva (ed.), *Special Applications of Photogrammetry*. IntechOpen, Rijeka, Chapter 6, <https://doi.org/10.5772/33999>.
- EFFLER, S. W., 1988: Secchi disc transparency and turbidity. *Journal of Environmental Engineering* 114(6), 1436-1447. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1988\)114:6\(1436\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1988)114:6(1436)).
- EREN, F., JUNG, J., PARRISH, C. E., SARKOZI-FORFINSKI, N. & CALDER, B. R., 2019: Total Vertical Uncertainty (TVU) Modeling for Topo-Bathymetric LiDAR Systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **85**(8), 585-596, <https://www.ingentaconnect.com/content/asprs/pers/2019/00000085/00000008/art00011>.
- FILISETTI, A., MAROUCOS, A., MARTINI, A., MARTIN, T. & COLLINGS, S., 2018: Developments and applications of underwater LiDAR systems in support of marine science. *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*, 1-10.
- FÖRSTNER, W. & WROBEL, B. P., 2016: *Photogrammetric Computer Vision: Statistics, Geometry, Orientation and Reconstruction*, Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 643-725, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-11550-4_15.
- GROBBELAAR, J., 2009: Turbidity. G. E. Likens (ed.), *Encyclopedia of Inland Waters*. Academic Press, Oxford, 699-704, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123706263000752>.
- GUENTHER, G., CUNNINGHAM, A., LAROQUE, P. & REID, D., 2000: Meeting the accuracy challenge in airborne LiDAR bathymetry. *Proceedings of the 20th EARSeL Symposium: Workshop on LiDAR Remote Sensing of Land and Sea*. Dresden, Germany.
- HICKMAN, G. D. & HOGG, J. E., 1969: Application of an airborne pulsed laser for near shore bathymetric measurements. *Remote Sensing of Environment*, **1**(1), 47-58, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425769900881>.
- HODÜL, M., BIRD, S., KNUDBY, A. & CHÉNIER, R., 2018: Satellite derived photogrammetric bathymetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **142**, 268-277, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271618301783>.
- IHO, 2020: S-44, Standards for Hydrographic Surveys, Edition 6.0, Standard 5th ed., International Hydrographic Organization, Monaco, https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44_Edition_6.0.0_EN.pdf, letzter Zugriff am 03.02.2023.
- IHO, 2022: Official website of the International Hydrographic Organization (IHO). <https://iho.int/en/>, letzter Zugriff am 03.02.2023.
- KOTOWSKI, R., 1988: Phototriangulation in Multi-Media-Photogrammetry. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* **27**, Kyoto, 324-334.
- KREIBICH, H., VAN LOON, A. F., SCHRÖTER, K. ET AL., 2022: The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management. *Nature*, **608**(7921), 80-86, <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04917-5>.
- KWASNITSCHKA, T., KÖSER, K., STICKLUS, J., ROTHENBECK, M., WEIB, T., WENZLAFF, E., SCHOENING, T., TRIEBE, L., STEINFÜHRER, A., DEVEY, C. & GREINERT, J., 2016: Deep-SurveyCam—A Deep Ocean Optical Mapping System. *Sensors*, **16**(2), <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/2/164>.

- LEGLEITER, C. J., DAR, A. R. & RICK, L. L., 2009: Spectrally based remote sensing of river bathymetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, **34**(8), 1039-1059, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/esp.1787>.
- LUHMANN, T., ROBSON, S., KYLE, S. & BOEHM, J., 2019: *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*, De Gruyter, Berlin, Boston, <https://doi.org/10.1515/9783110607253>.
- LURTON, X., 2010: *An Introduction to Underwater Acoustics - Principles and Applications*, 2 ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- LYZENGA, D. R., 1978: Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, **17**(3), 379-383.
- LYZENGA, D. R., Malinas, N. P. & Tanis, F. J., 2006: Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **44**(8), 2251-2259.
- MAAS, H.-G., 2015: On the Accuracy Potential in Underwater/Multimedia Photogrammetry. *Sensors*, **15**(8), 18140-18152, <http://www.mdpi.com/1424-8220/15/8/18140>.
- MACON, C. L., 2009: USACE National Coastal Mapping Program and the next generation of data products. *OCEANS 2009*, 1-7.
- MANDLBURGER, G., 2019: Through-water dense image matching for shallow water bathymetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **85**(6), 445-455.
- MANDLBURGER, G., 2020: A review of airborne laser bathymetry for mapping of inland and coastal waters. *Journal of Applied Hydrography*, **116**, 6-15.
- MANDLBURGER, G., 2022: A review of active and passive optical methods in hydrography. *International Hydrographic Review*, (28), 8-52, <https://doi.org/10.58440/ihr-28-a15>.
- MASSOT-CAMPOS, M. & OLIVER-CODINA, G., 2015: Optical Sensors and Methods for Underwater 3D Reconstruction. *Sensors*, **15**(12), 31525-31557. <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/12/29864>.
- MULSOW, C., 2010: A flexible multi-media bundle approach. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **36**(5), 472-477.
- MURASE, T., TANAKA, M., TANI, T., MIYASHITA, Y., OHKAWA, N., ISHIGURO, S., SUZUKI, Y., KAYANNE, H. & YAMANO, H., 2008: A photogrammetric correction procedure for light refraction effects at a two-medium boundary. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **74**, 1129-1136.
- NEUMANN, T., MARTINO, A., MARKUS, T., BAE, S., BOCK, M. R., BRENNER, A. C., BRUNT, K. M., CAVANAUGH, J., FERNANDES, S. T., HANCOCK, D. W., HARBECK, K., LEE, J., KURTZ, N. T., LUERS, P. J., LUTHCKE, S. B., MAGRUDER, L., PENNINGTON, T. A., RAMOS-IZQUIERDO, L., REBOLD, T., SKOOG, J. & THOMAS, T. C., 2019: The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite – 2 mission: A global geolocated photon product derived from the Advanced Topographic Laser Altimeter System. *Remote Sensing of Environment*, **233**, 111325. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003442571930344X>.
- NOAA, 2022: Coastal Topobathy Lidar. <https://coast.noaa.gov/digitalcoast/data/jalbtctx.html>, letzter Zugriff am 03.02.2023.
- NOCERINO, E. & MENNA, F., 2020: Photogrammetry: Linking the world across the water surface. *Journal of Marine Science and Engineering* **8**(2), <https://www.mdpi.com/2077-1312/8/2/128>.

- PHILPOT, W. (ed.), 2019: Airborne Laser Hydrography II, Cornell University Library (eCommons), Coernell. <https://ecommons.cornell.edu/handle/1813/66666>, letzter Zugriff am 03.02.2023.
- POICYN, F. C., BROWN, W. & SATTINGER, I. J., 1970: The measurement of water depth by remote sensing techniques, Technical Report 8973-26-F, Willow Run Laboratory, The University of Michigan.
- POPE, R. M. & FRY, E. S., 1997: Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. *Appl. Opt.*, **36**(33), 8710-8723, <http://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-36-33-8710>.
- RINNER, K., 1948: Abbildungsgesetz und Orientierungsaufgaben in der Zweimedienphotogrammetrie. *Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen, Sonderheft* (5).
- SANDWELL, D. T., MÜLLER, R. D., SMITH, W. H. F., GARCIA, E. & FRANCIS, R., 2014: New global marine gravity model from Cryosat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*, **346**(6205), 65-67, <https://science.sciencemag.org/content/346/6205/65>.
- SARDEMANN, H., MULSOW, C. & MAAS, H.-G., 2022: Accuracy Analysis of an Oblique Underwater Laser Light-sheet Triangulation System. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, **90**(1), 3-18, <https://doi.org/10.1007/s41064-022-00196-x>.
- SCHWARZ, R., MANDLBURGER, G., PFENNIGBAUER, M. & PFEIFER, N., 2019: Design and evaluation of a full-wave surface and bottom-detection algorithm for LiDAR bathymetry of very shallow waters. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **150**, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.02.002>.
- SORENSEN, G., HONEY, R. & PAYNE, J., 1966: Analysis of the use of airborne laser radar for submarine detection and ranging, Technical report, SRI Report No. 5583, Stanford Research Institute.
- STUMPF, R. P., HOLDERIED, K. & SINCLAIR, M., 2003: Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, **48**(1part2), 547-556, <https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.4319/lo.2003.48.1part.2.0547>.
- WAGNER, W., 2010: Radiometric calibration of small-footprint full-waveform airborne laser scanner measurements: Basic physical concepts. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **65**(6), 505-513, <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.06.007>.
- WESTFELD, P., MAAS, H.-G., RICHTER, K. & WEIL, 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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.04.008>.
- YANG, F., QI, C., SU, D., DING, S., HE, Y. & MA, Y., 2022: An airborne LiDAR bathymetric waveform decomposition method in very shallow water: A case study around Yuanzhi island in the South China sea. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **109**, 102788, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243422001143>.