

BMWK-gefördertes Verbundprojekt

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht von der OptoPrecision GmbH

Förderkennzeichen	03SX551C
Thema	REMAP – Sensorsystem-Hardware, Echtzeit Daten-Vorprozessierung
Thema des Verbunds	REMAP – Entwicklung Luftdrohnen-gestützter Echtzeitdatendienste aus optischen Sensoren für sicherheitsrelevante maritime Anwendungen Rapid Environmental Monitoring via Airborne optical Platforms (REMAP)
Durchführung	OptoPrecision GmbH Auf der Höhe 15 28357 Bremen
Projektleitung	Dr. Martin Nägele
Laufzeit	01.07.2021 - 31.12.2023
Berichtszeitraum	01.07.2021 - 31.12.2023
Datum	Juni 2024
Mit Beiträgen von	Martin Nägele, Hendrik Freiheit, Frank Lehmann
Verbundpartner	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für den Schutz maritimer Infrastrukturen, Institut für Optische Sensorsysteme EOMAP GmbH & Co. KG

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 03SX551C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Inhalt

1.	Kurze Darstellung	3
1.1.	Aufgabenstellung.....	3
1.2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
1.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	3
1.4.1.	Vergleich unterschiedlicher Multispektralkameras für den Einsatz auf Drohnen	4
1.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	7
2.	Eingehende Darstellung	7
2.1.	Verwendung der Zuwendung und die erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	7
2.1.1.	Erfassung der lokalen Neigung von Wasseroberflächen.....	7
2.1.2.	Trigonometrische Bestimmung der Wassertiefe	12
2.1.3.	Entzerrung der Bildverzeichnung durch die Neigung der lokalen Wasseroberfläche... ..	14
2.1.4.	Einfluss der Beleuchtung auf die Bestimmung der Oberflächenneigung.....	15
2.1.5.	Turmmessungen / Ground Truth.....	19
2.1.6.	Hexacopter UAV mit Sensoradaption für die Flugkampagnen.....	21
2.1.7.	Flugkampagnen Aussteuerung, Kalibrationsmessungen.....	24
2.1.8.	Technologieoffene Suche nach Lösungen zur Befriedigung zukünftiger Bedürfnisse der Kunden	27
2.1.9.	Zusammenfassung.....	28
2.1.10.	Ausblick.....	28
2.2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	30
2.3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	30
2.4.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	30
2.5.	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	31
2.6.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	32
	Literaturverzeichnis.....	33

1. Kurze Darstellung

1.1. Aufgabenstellung

OptoPrecision konzentrierte sich auf die Realisierung der Sensorhardware mit der Datenvorprozessierung abgestimmt auf ein geeignetes Fluggerät. Um die Sensordaten in einem geeigneten Roh-Format für die weitere Prozesskette von EOMAP zur Verfügung stellen zu können, mussten unter Berücksichtigung der Daten aus der Missionsanforderung, den Wind- und Wellenerwartungen, und der Leistungsfähigkeit des Fluggerätes Flugpfade definiert und Beobachtungsgeometrien entsprechend der erwarteten Einstrahlungsbedingungen festgelegt werden.

Die Messdaten wurden während des Fluges soweit vorprozessiert, dass für eine weitere Prozessierung unbrauchbare Bildregionen erkannt wurden. Ziel der Flugführung war es einen lückenlosen Bilddatensatz für die Prozessierung durch EOMAP zu erzeugen. Hierfür wurden in Phase 1 des Projektes, Bildkorrekturen durch Auswertung der Polarisation und Berechnung der lokalen Neigung der Wasseroberfläche erprobt. In Phase 2 wurde ein zusätzlicher Blauer Laser für die Bestimmung der Wassertiefe zum Einsatz gebracht.

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das vorliegende Projekt ist Teil der Gesamtstrategie von OptoPrecision, Fähigkeiten für Umweltmonitoring und Sicherungsmaßnahmen mit Hilfe von Drohnen aufzubauen. Die ressourceneffiziente Durchführung von Messkampagnen mit der Erzeugung von geo-referenzierten Datenprodukten, insbesondere im maritimen Umfeld, wird zukünftig eine wichtige Rolle für den Schutz unserer Umwelt und der öffentlichen Sicherheit spielen. Entsprechend konnten Synergieeffekte mit parallellaufenden Projekten genutzt werden. Sowohl Fluggeräte als auch Softwaremodule konnten über Projekte hinweg zum firmeninternen Standard gemacht werden. Die parallellaufende Entwicklung von senkrecht startenden Drohnen (VTOL) für den Einsatz unter maritimen Wetterbedingungen, auch mit Startfähigkeit vom Schiff aus, werden zukünftig die Einsatzmöglichkeiten beflügeln.

Die Zusammenarbeit mit dem Wissenschaftlichen Partner DLR-MI hat zu einer sehr erfolgreichen Arbeitsteilung mit entsprechender solider wissenschaftlicher Absicherung der Erkenntnisse geführt.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die genaue Aufteilung nach Arbeitspaketen ist dem Projektantrag zu entnehmen.

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Zu Beginn der Arbeiten wurde eine aktualisierte Literatur- und Marktrecherche durchgeführt.

Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass hinsichtlich der nutzbaren technischen Systeme und globalen Anwendungen in den letzten Jahren weltweit viele neue UAV-Systeme mit optischen Sensoren aufgebaut und erprobt wurden. Für den maritimen Bereich wurden von Universitäten und Ingenieurbüros Messsysteme auf UAV-Basis entwickelt, die früher nur sehr kostenintensiv von Schiffen und Vermessungsflugzeugen mit Flugzeug- und Helikoptersystemen durchgeführt werden konnten.

Dabei gibt es auch eine Reihe von rezenten Veröffentlichungen zum Thema UAVs und küstennahe Bathymetrie. Specht et al. [1], Agrafiotis et al. [2], Rossi et al. [3], konnten für Wassertiefen der Küstengewässer bis 2m einen Messfehler von 10% -15% RMSE für kamerabezogene superspektrale Kameradaten ermitteln. Für Wassertiefen bis 10m ergab sich eine ähnliche Größenordnung von 10%-15% Fehler in Relation zur Wassertiefe. Die Investitionskosten für Kamera und UAV lagen hier im Bereich von 20-30k€. Die Messzeit und die Aufnahmekapazität waren bei diesen kleinen Systemen (2-4kg) natürlich stark begrenzt. Die Hersteller photogrammetrischer Kamera- und Lasersysteme wie Riegel oder Teledyne entwickelten nun kleinere und kompaktere Systeme für kleine Messflugzeuge und große unbemannte Systeme (UL, große Drohnen für Start mit Startbahn), die zumeist aus einer Kombination von Laseraltimeter und Multispektralkamera bestehen und bei den Investitionskosten zwischen 500k€ und 1000k€ liegen.

1.4.1. Vergleich unterschiedlicher Multispektralkameras für den Einsatz auf Drohnen

Auf den Markt werden zur Zeit superspektrale Kamerasysteme (Toucan SILIOS, MAIA) angeboten, die für die bathymetrische Analyse (die Erfassung der Tiefe von Wasserflächen) geeignet sind und dabei gleichzeitig die Gewichts- und Leistungsanforderungen von potentiellen Nutzern und wissenschaftlichen Arbeitsgruppen einhalten, die Investitionen über 50k€ umgehen wollen. Nahezu alle dieser Nutzer fokussieren ihr Interesse klar auf den Bereich unter 5 kg Abfluggewicht von UAV und Nutzlast, sicherlich aus Kostengründen im Hinblick auf preisgünstige und kleine UAVs, zugunsten der Kompaktheit und Transportfähigkeit der Systeme, und der Sorge um aufwendige Fluganmeldungen und Zulassungsverfahren für den Einsatz in Projekten. Dabei sind Zulassungsbedingungen und Flugzulassungen in den letzten Jahren stark verändert worden, zum Teil auch mit deutlichen Verbesserungen für die logistischen Anforderungen eines Messeinsatzes. Dies gilt inzwischen auch für größere UAVs in der Gewichtsklasse über 5 kg.

Zur Auswahl des superspektralen Kamerasystems, das im Projekt mit der Polarisationskamera kombiniert werden sollte, wurde eingangs eine aktualisierte Literaturrecherche und ein Systemvergleich der beiden finalen Auswahlssysteme Toucan und MAIA durchgeführt.

Vorteile der MAIA-Kamera waren, dass hier pro Kanal jeder Sensor der 8 Spektralkanäle 1280 x 960 Pixel aufzeichnet, während die 10 Einzelkanäle der Toucan auf 512 x 512 Bildelemente reduziert sind. Mit einzelnen Spektralkanälen bietet die Toucan zwischen blauem und grünem Spektralkanal einen Kanal mehr in einem wichtigen Bereich des Spektrums.

Die Bildelementgröße (Pixel) ist bei der MAIA mit 3,75 µm deutlich kleiner als bei der Toucan mit 5,5 µm, was mit einem Flächenverhältnis von 1:2 zugunsten der Toucan auf ein Faktor 2 höheres SNR schließen lässt – bei Untersuchungsflächen mit geringer Albedo (Wasser 2 – 10 % Reflexionsgrad) ein wichtiger Einflussparameter zur genauen Erfassung der spektralen Eigenschaften.

Die MAIA besteht aus einzelnen Detektorelementen mit Objektiven, also 9 einzelnen Kameras, die aus thermischen Gründen natürlich nie zu 100 % geometrisch koregistriert sein können, was auch nach Aussagen von Anwendern insbesondere bei der Zuordnung und Fixierung einzelner Bildstreifen in ein Streifenmosaik zu Problemen führt.

Die Toucan hingegen bietet die 10 Spektralkanäle als Teilelemente einer Detektorfläche, was eine feste Geometrie aber auch ein Resampling von 4x4 nötig macht und damit eine geringere räumliche und spektrale Auflösung zur Folge hat.

Auch die geringere radiometrische Auflösung der Toucan von 10 bit ist ein deutlicher Nachteil gegenüber der MAIA, was sich später auch insbesondere bei wechselnder Beleuchtung gezeigt hat.

Aufgrund der genannten Vorteile der Toucan wurde diese Kamera für das Vorhaben beschafft.

Vergleich Toucan / MAIA

Kamera	Toucan CMS-T4-C	MAIA WV
Gewicht in g	180 (ohne Optik)	290
Pixel pro Kanal	512 x 512	1280 x 980
Detektorgröße	5,5 µm	3,75 µm
Anzahl der Spektralkanäle	10 + Pan	8 + Pan
Signaldigitalisierung	10 bit	12 bit
Messeinheit Himmelsstrahlung	nein	ja
Bilder pro Sekunde		

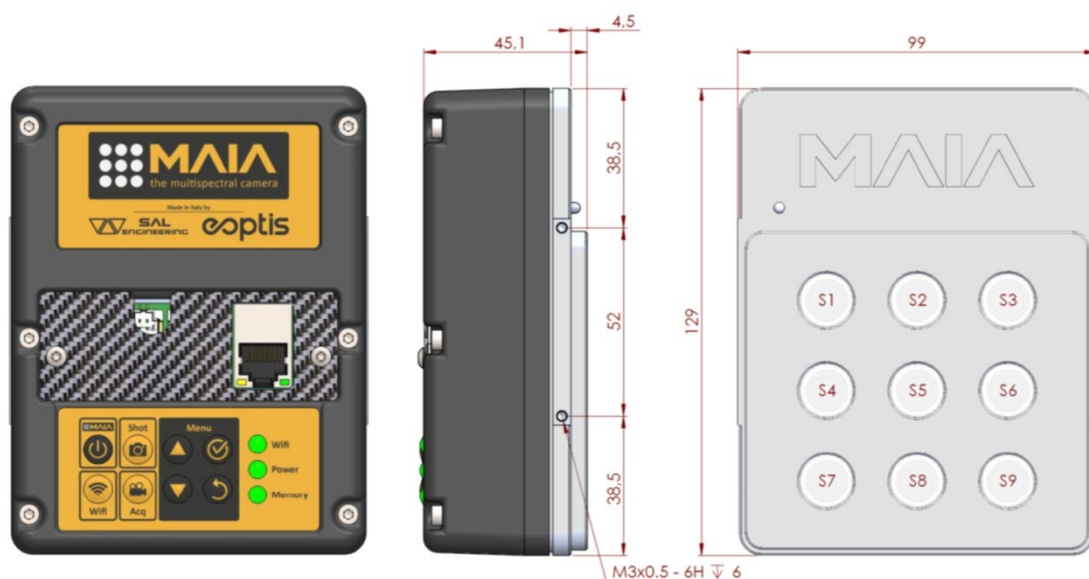


Bild 1: MAIA Kamera mit 9 Objektiven der einzelnen superspektralen Kameras [4]



Bild 2: Toucan Kamera ohne Objektiv mit 2k Detektor [5]

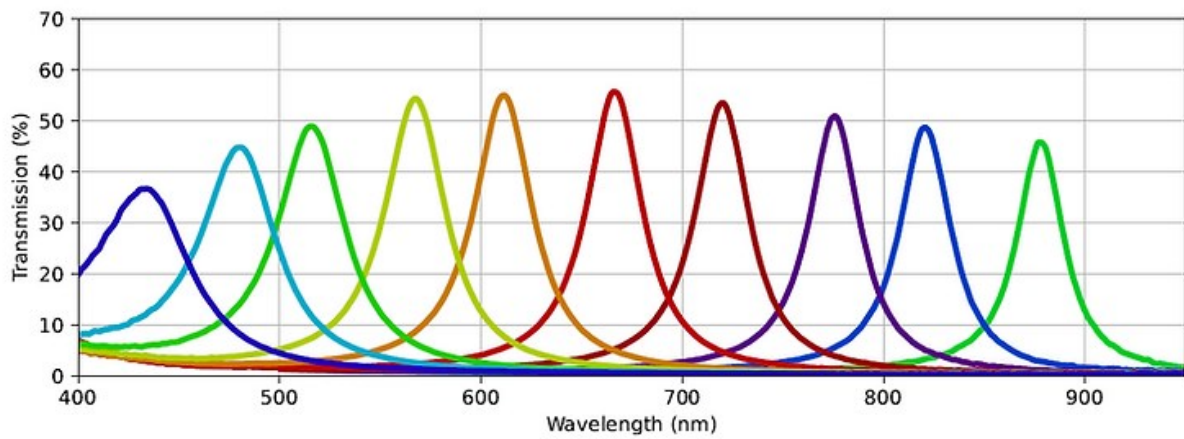


Bild 3: Toucan Position der Spektralkanäle [5]

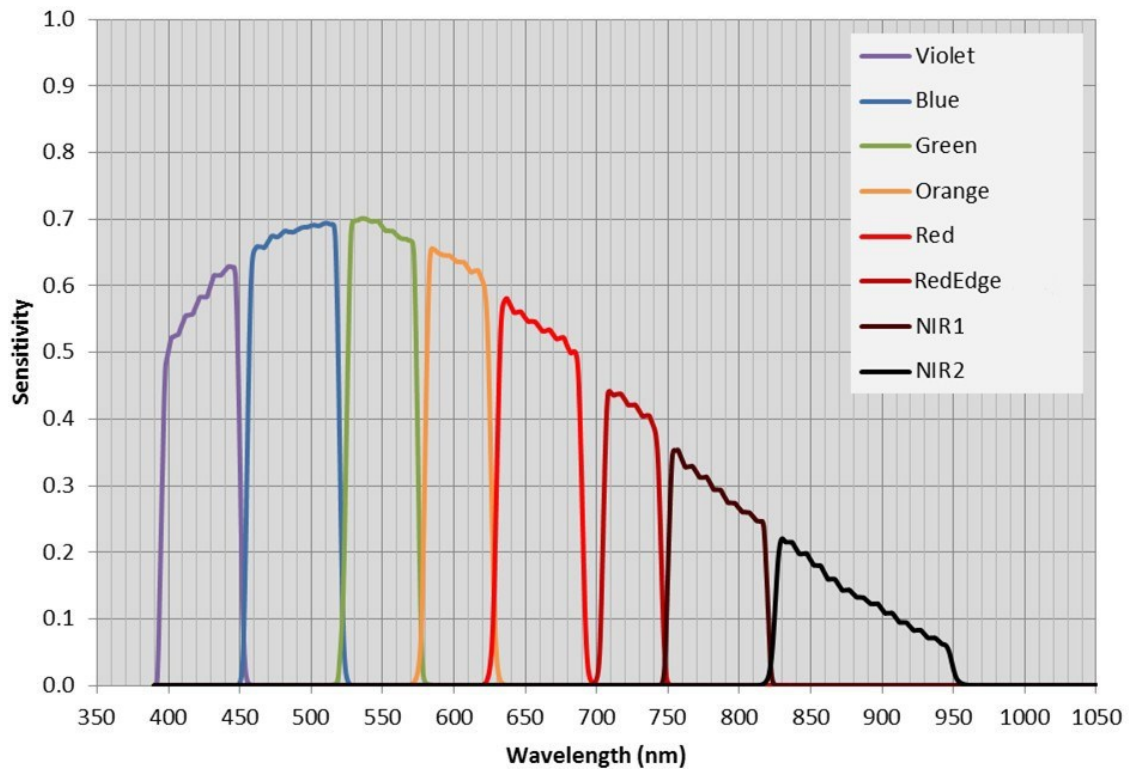


Bild 4: Position der Spektralkanäle der MAIA – Kamera (aus MAIA Datasheet, [4])

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projektes wurde intensiv mit den Projektpartnern DLR-MI und EOMAP zusammengearbeitet. Darüber hinaus konnten Synergieeffekte mit thematisch ähnlich gelagerten Projekten sowohl im DLR als auch bei OptoPrecision genutzt werden um den projektübergreifenden Know-How Aufbau voran zu treiben.

2. Eingehende Darstellung

2.1. Verwendung der Zuwendung und die erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

2.1.1. Erfassung der lokalen Neigung von Wasseroberflächen

Ziel ist es, an einem UAV ein Kamerasystem zu integrieren, welches Bildinformationen zur Berechnung der lokalen Neigung einer überflogenen Wasseroberfläche an jedem Pixel liefert. Mit diesem Wissen können Bilddaten anderer Messsysteme die ins Wasser hineinschauen, und dadurch eine Verzeichnung erfahren korrigiert werden.

Theoretischer und technischer Hintergrund

Mit einem Sony Polarsens Sensor können Pixelweise die Polarisationszustände einfallenden Lichts bestimmt werden. Dabei kann ein Pixel zwischen den linearen Polarisationszuständen 0° , 45° , 90° und 135° unterscheiden. Dadurch kann der Stokes Vektor des einfallenden Lichts bis auf S_4 (dieser beschreibt den Zustand der Zirkularen Polarisation) vollständig bestimmt werden. Der Stokes Vektor kann auch vollständig über das DoLP (Degree of Linear Polarization), den AoLP (Angle of Linear Polarisation), den DoCP (Degree of Circular Polarization) und den AoCP (Angle of Circular Polarisation) beschrieben werden. Zunächst wird angenommen der DoCP und der AoCP fallen weg, da zirkular polarisiertes Licht selten in der Natur vorkommt.

Über die Fresnelschen Formeln kann aus dem DoLP des gemessenen Lichts der Winkel zwischen Sichtachse und Wasseroberfläche berechnet werden. Dabei gibt es zwei unterschiedliche Arten wie das Licht an der Wasseroberfläche reflektiert werden kann: Die gerichtete Reflexion (specular reflection) und die diffuse Reflexion (diffuse reflection). Bei der gerichteten Reflexion wird das Licht direkt an der Wasseroberfläche reflektiert, bei der diffusen Reflexion dringt es in den Wasserkörper ein, wird an Partikeln gestreut und verlässt dann wieder den Wasserkörper.

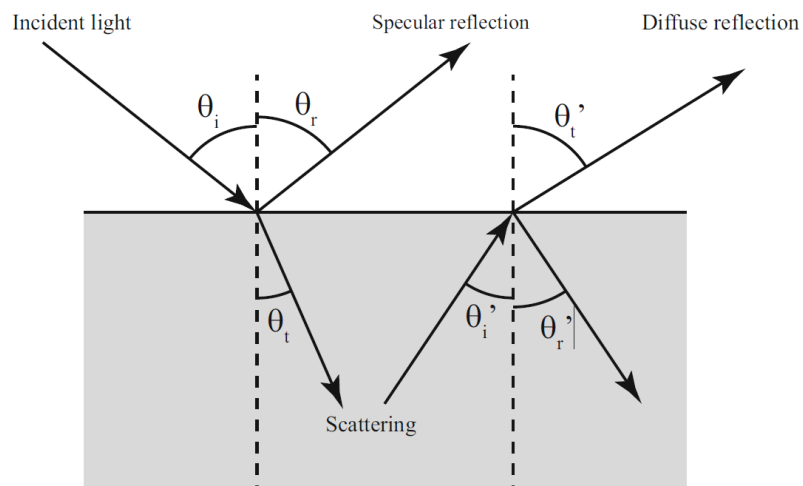


Abbildung 5: Schematische Darstellung von gerichteter und diffuser Reflexion [6].

In Abbildung 6 sind die vorhandenen Winkel dargestellt. Die Drohne fliegt auf der Zenith-Achse z . Der Winkel θ ist wie schon in Abb. 5 der Winkel des Ausfallenden Lichts und φ wird mit dem AoLP verknüpft – Später wird der Vektor p die lokale Oberflächennormale der Wasseroberfläche.

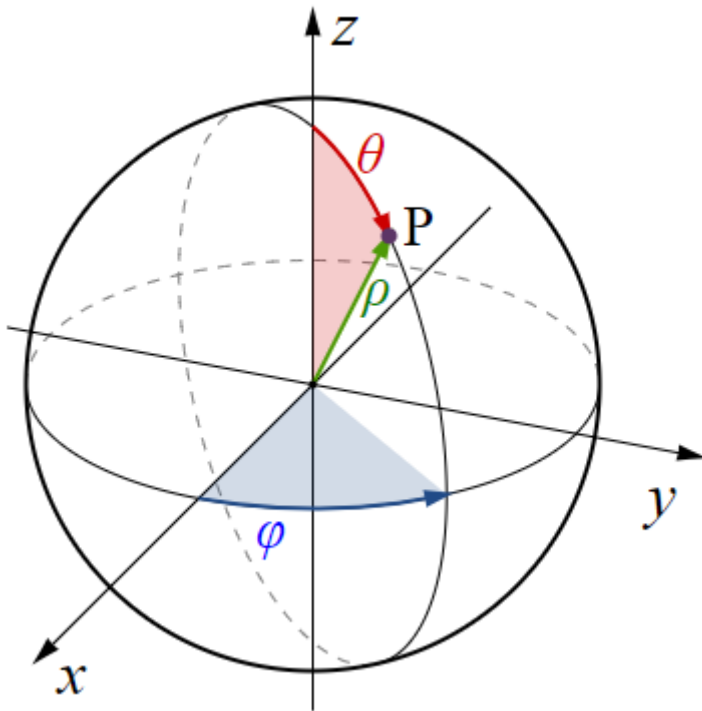


Abbildung 6: Darstellung der Winkel [7].

Aus den Fresnelschen Formeln folgt der In Abb. 7 gezeigte Zusammenhang:

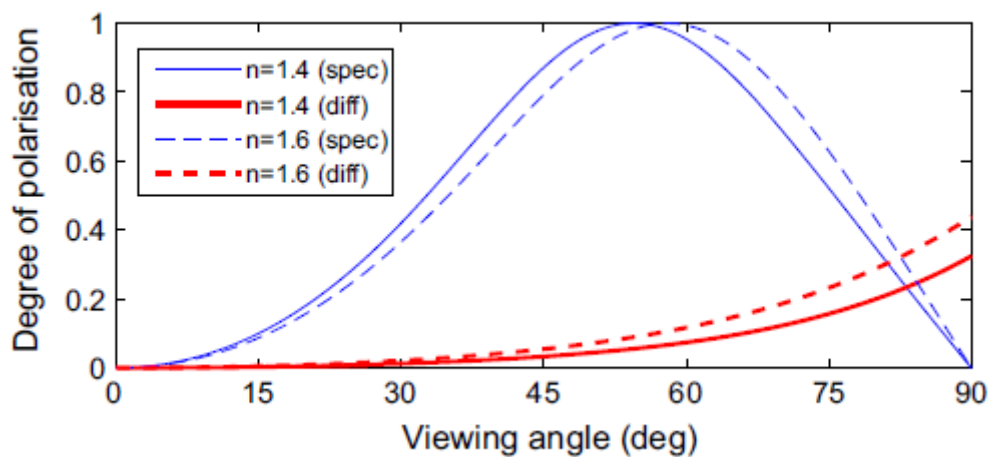


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen DoLP und Austrittswinkel Lichts [6].

Bei der diffusen Reflexion ist der Zusammenhang eindeutig. Bei gerichteter Reflexion gibt es eine Zweideutigkeit: Entweder der Reflexionswinkel vom Wasserkörper ist kleiner als der Brewster-Winkel, oder größer. In unserem Fall, einer Beobachtung mit der Drohne die senkrecht nach unten aufs Wasser schaut, wird er meist kleiner als der Brewster-Winkel sein (Außer bei extrem steilen Wellen).

Die Zusammenhänge sind: $\text{DoLP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}$, und $\text{AoLP} = \varphi = 0.5 \arctan2(S_2, S_1) + 90^\circ$, für gerichtete Reflexion [6].

Die Oberflächennormalen setzen sich zusammen aus Θ innerhalb Brewsterwinkel bis 90° und φ innerhalb 0° bis 180° . Das bedeutet wir wissen wie stark eine Oberfläche geneigt ist (Θ), aber nicht ob sie beispielsweise nach rechts oder links gerichtet ist (90° oder 270°).

Bei ersten Tests mit dem vollen Spektrum des sichtbaren Lichtes an einem Testbecken mit ca. 1 m Wassertiefe und einem Schachbrettmuster auf dem Beckenboden konnte verifiziert werden, dass für sichtbares Licht, selbst bei klarem Wasser ohne streuende Verunreinigungen, das in den Wasserkörper eindringende Licht so störend für die Auswertung des Polarisationszustandes an der Wasseroberfläche ist, dass keine fehlerfreie Bestimmung der lokalen Oberflächenneigung möglich ist.

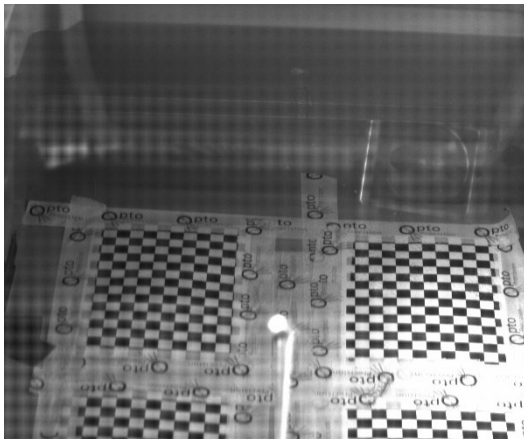


Abbildung 8: Polarsens Bild von gefülltem Wasserbecken mit darunterliegendem Schachbrettmuster

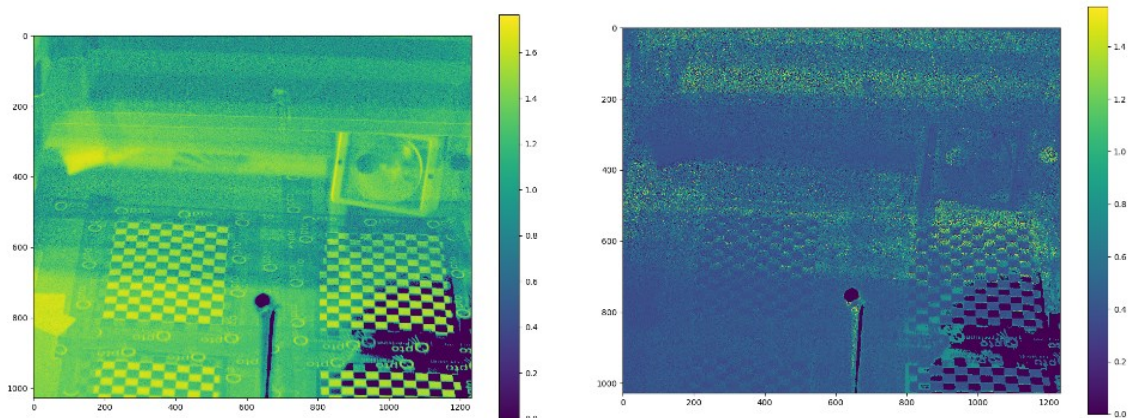


Abbildung 9: links: DoLP bzw. Θ und

rechts AoLP bzw. φ

Das Schachbrettmuster zeigt sich dabei sehr deutlich im AoLP und DoLP. Die Neigung der Wasseroberfläche muss aber unabhängig vom Schachbrettmuster sein! Die Absorption des Lichtes im Wasser steigt mit der Wellenlänge jenseits des grünen Spektralbereichs stark an. Der Polarsens Sensor basiert auf Siliziumtechnologie, entsprechend kann die Wellenlänge des genutzten Lichtes nur bis in den NIR-Bereich verlängert werden, womit die Eindringtiefe des Lichtes auf wenige Zentimeter reduziert werden kann. Für alle weiteren Messungen wird ein 850nm Langpass-Filter vor dem Objektiv der Polarsens Kamera eingesetzt, um bei noch ausreichender Sensitivität der Kamera die Eindringtiefe zu minimieren.

Mit dieser Wellenlänge unterdrücken wir stark die diffuse Reflexion und betrachten hauptsächlich Licht was direkt von der Wasseroberfläche reflektiert wird.

Die Messungen am Becken werden mit 850nm Langpass-Filter wiederholt, um die entwickelten Algorithmen auf korrekte Funktion zu überprüfen. Das Schachbrettmuster ist für die Polarsens-Kamera nun kaum noch sichtbar.

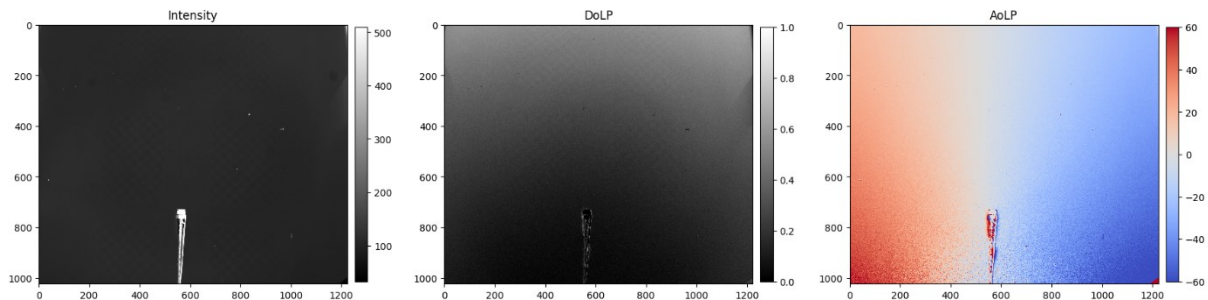


Abbildung 10: Wie erwartet zeigt der AoLP oben nach 0°, links wandert er in die positiven Gradzahlen (nicht über 90°) und nach rechts wandert er in die negativen Gradzahlen.

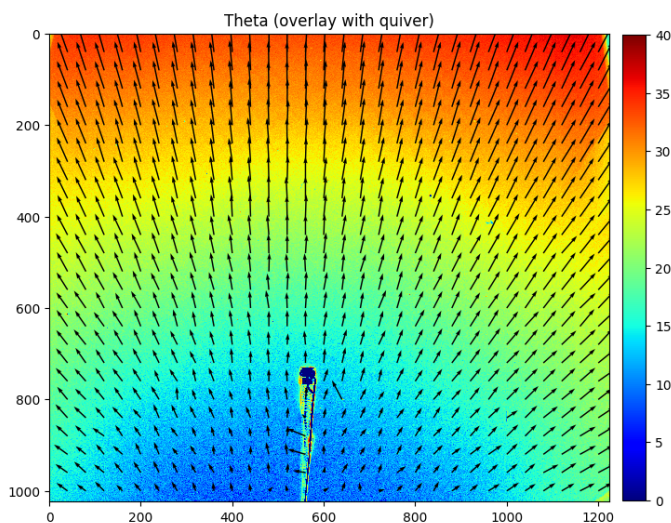


Abbildung 11: Darstellung der Oberflächenorientierung relativ zur Sichtachse auf den jeweiligen Bildpunkt.

Der Winkel Theta nimmt vom Nadir-Winkel (senkrecht auf Wasseroberfläche) vom unteren Bildrand ausgehend zu, da der Winkel von Wasseroberfläche zu Kamera größer wird. Die Oberflächenvektoren sind entsprechend eingezeichnet, womit die korrekte Funktion der Bildauswertung nachgewiesen werden konnte.

Parallel zu diesem generellen Funktionsnachweis wurde vom Team am DLR-MI die Präzision der Polarisationsbestimmung mit Hilfe des Polarsens Sensors untersucht [8]. Kalibrationsprozesse zur Minimierung der Abweichungen wurden entwickelt und erprobt. Insbesondere die Abhängigkeit der Messgenauigkeit von der Wellenlänge des Lichtes erklärt u.a. die mangelnde Präzision der unten dargestellten Messungen. (Siehe Abschlussbericht DLR-MI [8], [9])

Die Bestimmung des AoLP auf den Bereich 0-180° beschränkt. Da wir davon ausgehen, dass wir eine kontinuierliche Wasseroberfläche ohne scharfe Kanten haben, können wir an den Stellen eines Phasensprunges die Drehrichtung der Oberflächennormalen ändern. Diese Überlegungen sind aus der optischen Messtechnik bekannt und werden als ‚Phase-unwrapping‘ (Phasenverstetigung) bezeichnet. Das resultierende AoLP sieht bei Positionierung der Kamera senkrecht über dem Bildfeld aus wie in Bild 12 dargestellt. Dabei ist der Bildbereich mit dem Schatten durch die Kamera nicht auswertbar. Ferner ist zu bemerken, dass bei kleinen Neigungen Abweichungen durch Messfehler zu sehen sind.

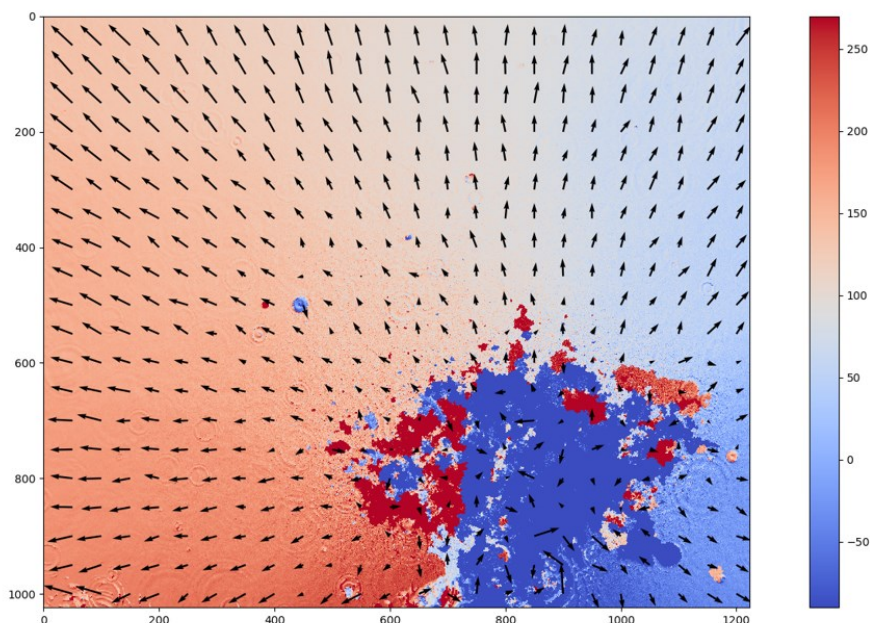


Abbildung 12: Darstellung der Oberflächenorientierung relativ zur Sichtachse auf den jeweiligen Bildpunkt mit Phase-unwrapping.

2.1.2. Trigonometrische Bestimmung der Wassertiefe

Für die korrekte Entzerrung des Bildes auf Basis der bekannten lokalen Neigung der Wasseroberfläche muss die Wassertiefe bis zur erfassten Objektebene bekannt sein. Um unabhängig von der multispektralen bathymetrischen Auswertung diese Information zu erhalten, wurde ein blauer Laser geneigt punktförmig in das Becken gestrahlt um damit eine trigonometrische Auswertung zu machen.

Für diese Tests wurde ein Becken mit ca. 1m Wassertiefe und Schachbrettmuster auf dem Grund genutzt. In Bild 13 wurde zunächst die glatte Wasseroberfläche erfasst. In Bild 14 ist die Situation mit welliger Wasseroberfläche dargestellt. Wichtig für die Bestimmung der Wassertiefe ist, dass sowohl der Punkt des Strahleintritts in die Wasseroberfläche als auch der Punkt der Streuung am Grund deutlich zu sehen ist. Mit diesem Beiden Koordinaten, der bekannten Oberflächenneigung an den Koordinaten zum Zeitpunkt der Bildaufnahme und dem Einstrahlwinkel des Lasers relativ zur Kamerasichtachse lässt sich die Wassertiefe errechnen.

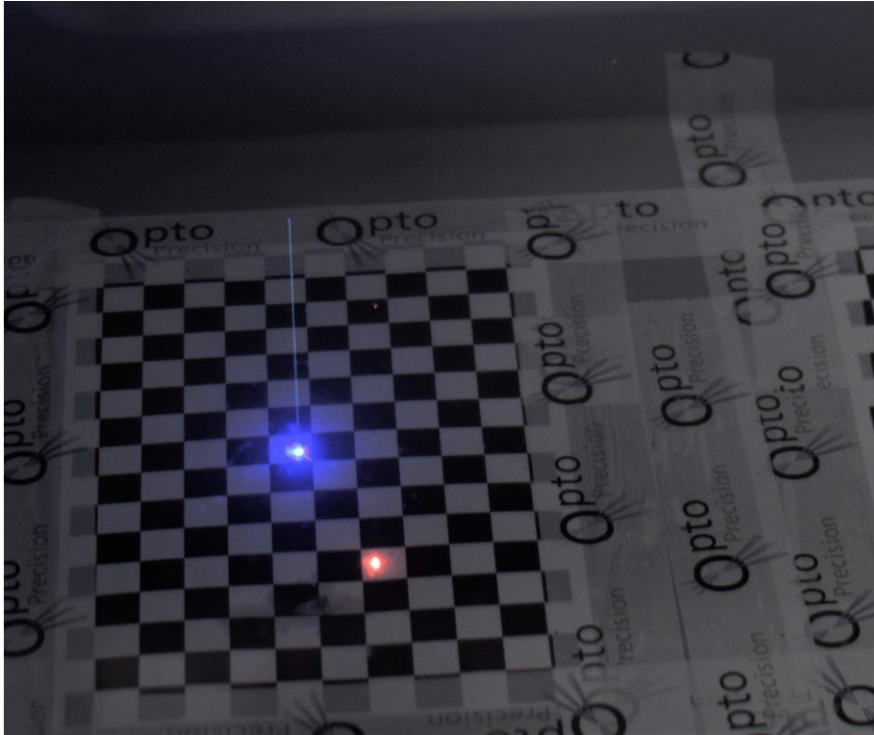


Bild 13: Glatte Wasseroberfläche, mit blauem Pilotlaser zur Bestimmung der Wassertiefe.

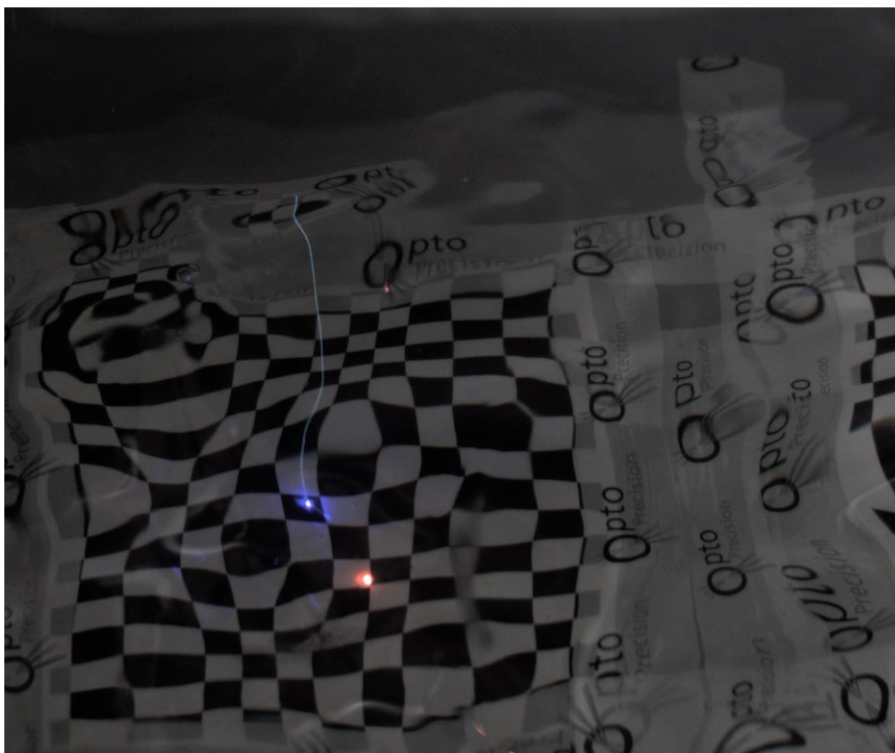


Bild 14: Sehr wellige Oberfläche mit Pilotlaser zur Bestimmung der Wassertiefe.

2.1.3. Entzerrung der Bildverzerrung durch die Neigung der lokalen Wasseroberfläche

Der Bild-Entzerrungsprozess wurde zunächst an einem Testaufbau am Testbecken verifiziert. In Bild 15 ist der Testaufbau zu sehen. Definiert erzeugte sinusähnliche Wellen konnten ausgewertet und die lokale Oberflächenneigung visualisiert werden. Ein Beispiel hierfür ist in Bild 16 dargestellt. In Bild 17 ist ein Originalbild und ein dazugehöriges entzerrtes Bild dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Bildqualität etwas verbessert werden kann, aber der Gesamteindruck noch nicht zufriedenstellend ist.

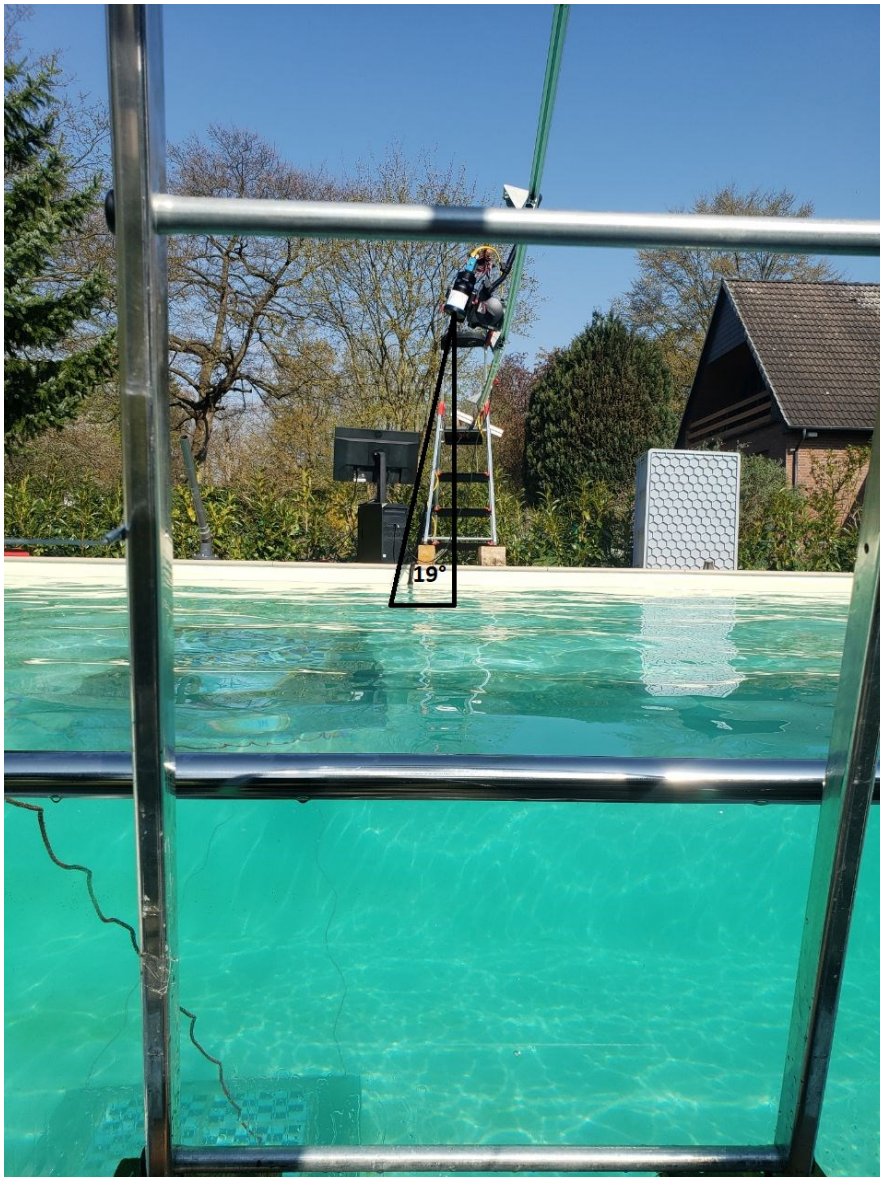


Bild 15: Testaufbau am Becken. Es ist sowohl der Kameraaufbau mit dem Steuerrechner im Hintergrund als auch das Testchart am Boden des Beckens zu sehen.

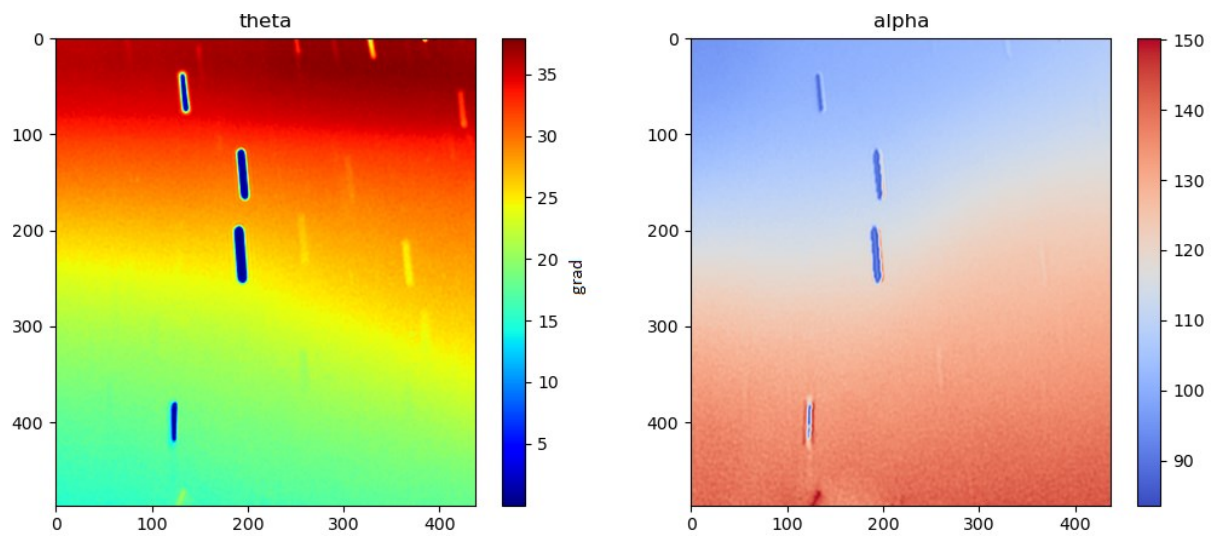


Bild 16: Falschfarbendarstellung der lokalen Oberflächenneigung einer beispielhaften Welle am Becken. Sofort zu sehen sind auch die Störungen, die durch auf der Wasseroberfläche schwimmende Objekte ausgelöst sind.

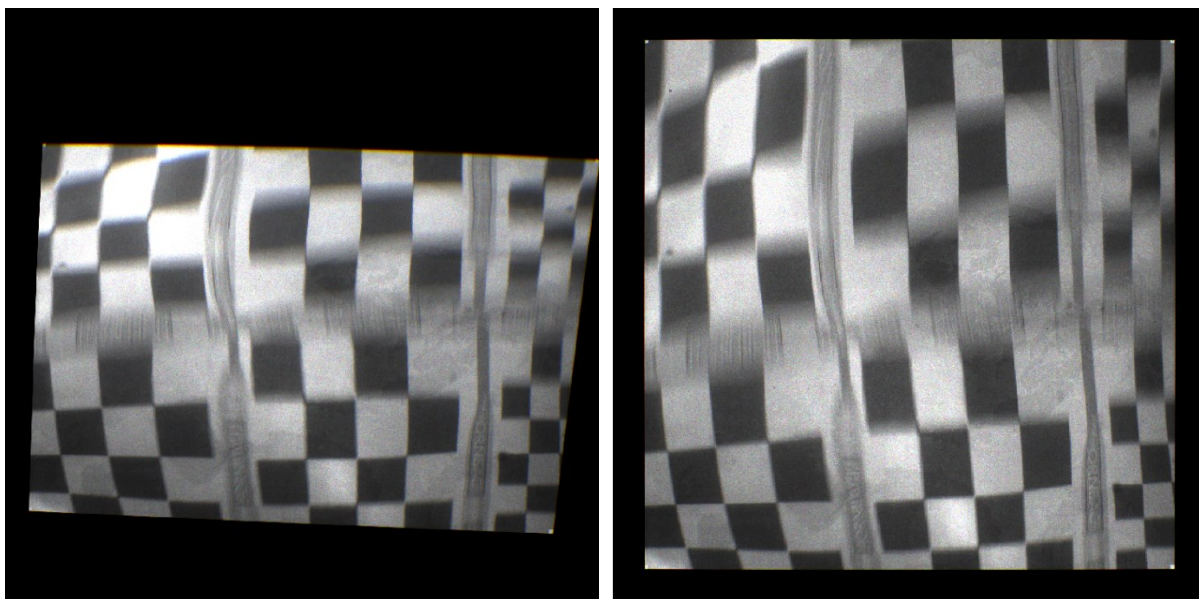


Bild 17: Rechts ist ein Originalbild aus dem Beckenexperiment dargestellt. Auf der linken Seite ein zugehöriges Bild mit einfacher Entzerrung.

2.1.4. Einfluss der Beleuchtung auf die Bestimmung der Oberflächenneigung

Es wurden Aufnahmen sowohl bei Sonnenschein, teilbewölktem Himmel als auch bei vollständig bedecktem Himmel gemacht.

Dabei zeigt sich, dass es für die Auswertung der gerichteten Reflexion an der Wasseroberfläche ideal ist, wenn ein möglichst gleichmäßig hell leuchtender, mit Wolken bedeckter Himmel vorhanden ist. So findet sich für jeden Neigungszustand der Wasseroberfläche ein Segment am Himmel für die Einstrahlung von unpolarisiertem Licht. Die Helligkeitsdynamik im Bild ist bei voll bewölktem Himmel durch den Sensor der Polarsens-Kamera gut beherrschbar. Bedauerlicherweise ist der voll mit Wolken bedeckte Himmel sehr unvorteilhaft für die multispektrale bathymetrische Auswertung des Lichtes aus dem Wasserkörper.

Bei Sonnenschein wird durch den Punktstrahler Sonne unter definiertem Winkel eine hohe Intensität zur Verfügung gestellt. Je nach Sonnenstand liegt ein bekannter teilpolarisierter Zustand des eingestrahnten Lichtes vor. Bei Sonnenschein zeigt sich die gerichtete Reflexion in Form von „sun-glint“ im Bild, d.h. es liegt eine sehr hohe Intensität für die exakte Übereinstimmung der Reflexionsbedingung vor und bei leicht veränderten Oberflächenneigungen fällt die Intensität sofort um Größenordnungen ab. Der Dynamikbereich einer solchen Bildaufnahme ist durch verfügbare bildgebende Sensoren nicht erfassbar. Entsprechend muss der Flugpfad und der Kamerablickwinkel auf die Wasseroberfläche so gewählt werden, dass kein sun-glint zu sehen ist. Damit wird dann das in der Oberflächenschicht diffus reflektierte Licht im Bild erfasst, was andere Fresnel-Gleichungen, wie in Abb.7 visualisiert, für die Berechnung der lokalen Oberflächenneigung zugrunde legt.

Es zeigt sich, dass Aufnahmen bei teilbewölktem Himmel nicht auswertbar sind, da hier eine Mischung aus gerichteter und diffuser Reflexion vorliegt. Es konnten keine Möglichkeiten zur Trennung dieser Bildanteile gefunden werden.

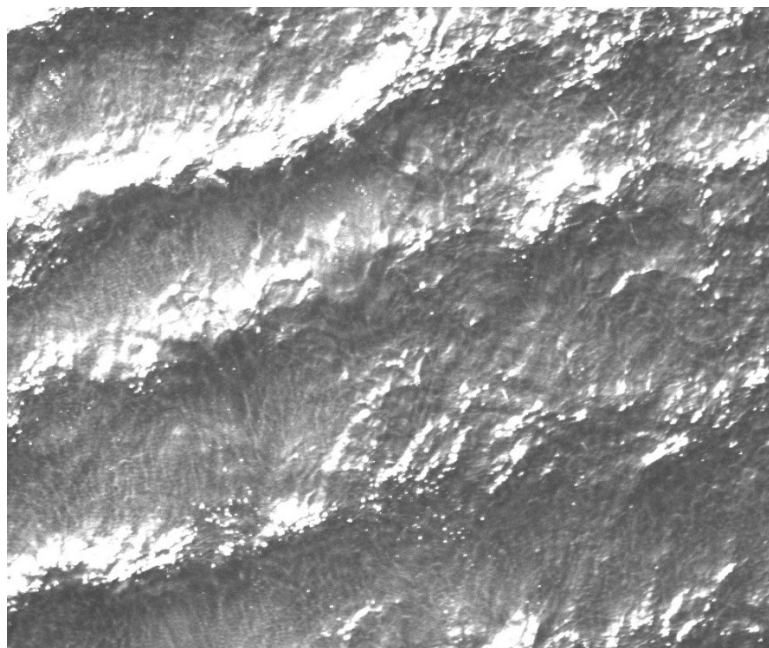


Bild 18: Bildaufnahme der Polarsens Kamera bei der Flugkampagne in der Kieler Förde.

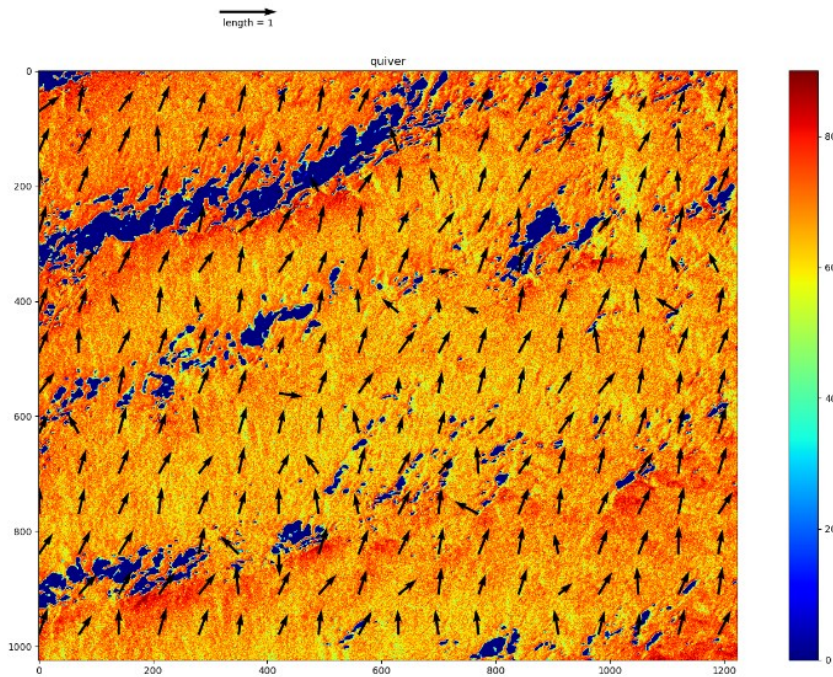


Bild 19: Auswertung der Bildaufnahme 18. unter der Annahme diffuser Reflexion.

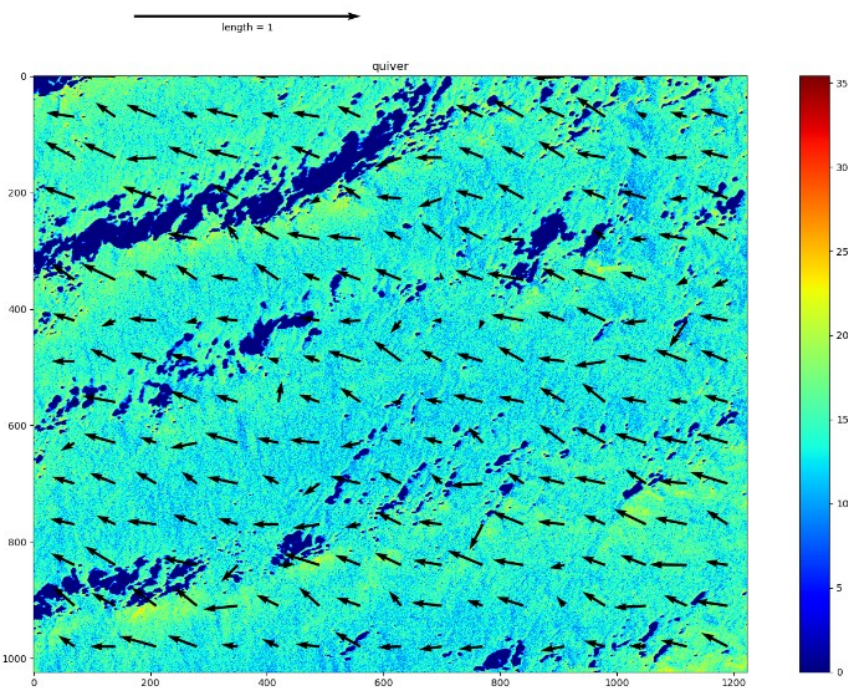


Bild 20: Auswertung der Bildaufnahme 18. unter der Annahme gerichteter Reflexion.

Bei diesen Aufnahmen zeigen die Quiverpfeile nie in die korrekte Richtung (nach oben links wäre korrekt). Das liegt daran, dass wir nicht wissen wie viel der Reflexion gerichtet und diffus sind. Zusätzlich kommt noch der blaue teilpolarisierte Himmel hinzu, der die Messergebnisse verfälscht.

Auch den Flanken der Welle werden teilweise falsche Ausrichtungen (AoLP) und Steigungen (DoLP) zugeordnet.

Es kann zukünftig versucht werden in den SWIR Bereich auszuweichen (1550nm – 1700nm). Dort ist die Absorption des Wassers 3000x stärker als noch im NIR Bereich. Dadurch hätten wir deutlich weniger Fehler in der Oberflächenberechnung durch diffuse Reflexion im Wasserkörper. Hier haben wir bei Bewölkung (Wolken strahlen sehr stark unpolarisiertes Licht bis tief in den IR Bereich aus) ideale Lichtverhältnisse um mit der gerichteten Reflexion die Oberfläche rekonstruieren zu können.

Bei blauem Himmel wird vermutlich dennoch nichts zu sehen sein, da der blaue Himmel durch Rayleigh Streuung an N₂ und O₂ Molekülen zustande kommt. Je kleiner die Wellenlänge, desto größer der Streuwinkel. Für den SWIR Bereich bedeutet das: nur bei der Sonne, oder in näherer Umgebung der Sonne wird viel SWIR Licht auftreten. Der Rest des Himmels wird relativ dunkel erscheinen. Auch die Schwarzkörperstrahlung der Atmosphäre beginnt erst ab 2,5µm und ist somit nicht sichtbar.

Hierfür benötigt es allerdings drei SWIR Kameras und drei SWIR lineare Polfilter.

Zusammenfassung

Es ist gelungen bei bewölktem Himmel die lokalen Ausrichtungen von Wasseroberflächen zu vermessen. Durch einen großen Messfehler der Polarisationsgenauigkeit der Polarsens im NIR ist es dennoch nicht möglich Bilder vom Grund vorteilhaft zu „entzerren“, d.h. eine Verbesserung der Bildqualität zu erreichen.

Bei Sonnenschein erhalten wir einen größeren Anteil an diffuser Reflexion, der sich nicht von der gerichteten Reflexion trennen lässt. Zusätzlich ist bei klarem Himmel das einfallende Himmelslicht teilpolarisiert. Diese Messungen liefern schlechte Ergebnisse.

2.1.5. Turmmessungen / Ground Truth

Da die Bewegungsunschärfe von Drohnenaufnahmen bedingt durch die Vorwärtsbewegung der Kamera und die Vibrationen des Gesamtsystems einen zusätzlichen Qualitätsverlust der Kameradaten hervorrufen, waren zur genaueren Analyse der Signalqualität, der Kalibration und der quantitativen Bestimmung der optimalen Betriebsparameter der Kamera Messungen von einem Messturm vor der eigentlichen Befliegung geplant. Zum flexiblen Einsatz vor Ort und der Durchführung von Messungen während des gesamten Messtages wurde ein 10m Stativ im Uferbereich aufgebaut, das im Gesichtsfeld der stativgetragenen Kameras auch die Kalibrationstargets und das Stativ mit den Strahlungsmessgeräten hatte. Über den gesamten Messtag wurden Messungen in diesem Bereich wiederholt um Erfahrungen für den späteren projektbezogenen Einsatz zu gewinnen. Besonders wichtig ist hier der Wunsch, mit Flugaufnahmen bereits bei niedrigen Sonnenständen und geringeren Wellenbewegungen (später am Tag bedingt durch Thermik und auflandigen Wind) am frühen Morgen Messflüge durchführen zu können.

Zusätzlich wurden vom DLR parallel zu den Turmmessungen mit Hilfe einer stationären stativgetragenen Messsonde (Bild) die einfallende und vom Seeboden reflektierte Strahlung direkt neben dem Kalibrationsfeld gemessen. Auf einem Stativ, das neben dem Kalibrationstarget teilweise vom Wasser bedeckt auf dem Seeboden stand, waren 2 Radiometer vom Typ RAMSES der Firma TriOS montiert, die die „downwelling irradiance“ und die „upwelling irradiance“ gleichzeitig messen und aufzeichnen konnten und den gesamten spektralen Messbereich der Toucan Silios Kamera abdecken konnten (400nm – 950 nm). Beide Spektrometer waren für Wasser und Luft kalibriert, somit konnte durch Versetzen des Stativs ins flachere Wasser auch die entsprechenden Strahlungswerte für den Bereich über Wasser aufgezeichnet werden, was eine Erfassung der gesamten Strahlungsbilanz über den Messtag ermöglichte.





Bild 21: **Bild Seite 19:** Stativ mit Strahlungsmessgeräten, Kalibrationstargets und Mitarbeiter des DLR bei der Erstellung des Unterwasservideos, **Bild oben:** Aufnahme des Seebodens (Sand, Schluff) in 1,5m bis 3,5m Tiefe, die Trübung über eine Entfernung von 4m durch Schwebstoffe ist deutlich zu erkennen, **Bild unten** Bildaufnahme der Untersuchungsregion vom UAV aus.

Neben diesen Messungen wurde zusätzlich mit einem Strahlungsmessgerät die globale Himmelstrahlung während der Messungen aufgezeichnet, um die richtige Aussteuerung der Kameras

unter variablen Beleuchtungsbedingungen (Sonnenstand, Wolkenbedeckung, Sichtweite und Aerosolgehalt) für den gesamten Tagesverlauf aufzuzeichnen und abzusichern.

Der Messtag am 20.6.2024 bot alle Bedingungen von blauem Himmel und extremer Sichtweite am Morgen (siehe Bild oben), Teilbewölkung, Bewölkung unterschiedlicher Bewölkungstypen bis zu einer hochliegenden Dunstschicht mit Sonneneinstrahlung. Auch direkt vor der Befliegung wurden Turmmessungen durchgeführt, um die finale Aussteuerung der Multispektralkamera Toucan für den Messflug zu optimieren. Veränderung der Himmelstrahlung wurden während der Befliegung im Messbereich aufgezeichnet.

2.1.6. Hexacopter UAV mit Sensoradaption für die Flugkampagnien

Zur Erprobung der Kamerasysteme wurde ein Raptor-Carbon-Hexacopter der Firma Premium Modellbau eingesetzt und von OptoPrecision mit entsprechenden Subsystemen aufgebaut (Bild 21). Das System ist bis 10 kg Nutzlast ausgelegt und ermöglicht je nach Auslastung bis zu 1 Stunde Messbetrieb. Das Fluggerät trägt die Multispektralkamera und die Polarisationskamera mit Objektiven so, dass das gleiche Gesichtsfeld erfasst wird. Das sehr große, lichtstarke Objektiv ist vor der Polarisationskamera montiert um auch bei der notwendigen spektralen Filterung noch ausreichend Licht für die Belichtung mit relativ kurzen Belichtungszeiten zu erhalten. Zusätzlich wird in der Bildmitte mit einem Laser-Rangefinder die Flughöhe verifiziert. Für die Erfassung der hemisphärischen Einstrahlung ist im Zentralbereich des Fluggerätes eine RGB-Kamera mit Fischaugenobjektiv nach oben gerichtet montiert. Im hinteren Bereich des Fluggerätes ist der Ausleger mit dem montierten blauen Laser zu sehen, der die redundante Berechnung der Wassertiefe ermöglichen soll.



Bild 21: REMAP-Demonstrator: Hexacopter mit Kameratechnologie und onbord-Datenerfassung und Prozessierung.

In den Bilder 22,23 und 24 sind die Roh-Daten der Multispektralkamera und der Polarsens-Kamera dargestellt, wie sie sofort während des Fluges verifiziert werden um eine korrekte Aussteuerung der

Kamera sicherzustellen, damit die nachfolgenden Prozessschritte erfolgreich durchgeführt werden können.

Die Bilder 22,23 und 24 zeigen Aufnahmen der Flugkampagne beim Leuchtturm Friedrichsort in der Kieler Förde. Diese Bilder zeigen die Herausforderungen, die bei der Prozessierung realer Bilder gemeistert werden müssen. Übersteuerte oder sonstig unbrauchbare Pixel im Bild durch direkte Sonnenreflexion oder auf der Wasseroberfläche schwimmende Objekte müssen erkannt werden. Diese Bildlücken müssen mit geeigneten Interpolationsmethoden aufgefüllt werden.

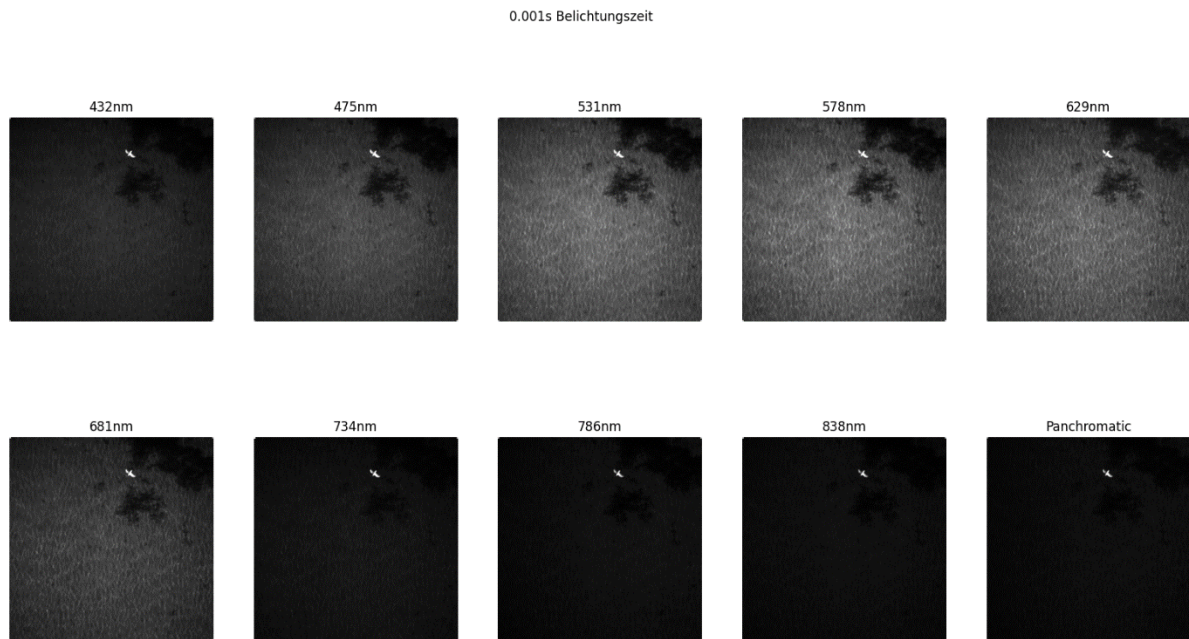


Bild 22: Multispektral-Bild einer Flachwasserzone in der Kieler Förde mit einer Möve als Störung im Bild.

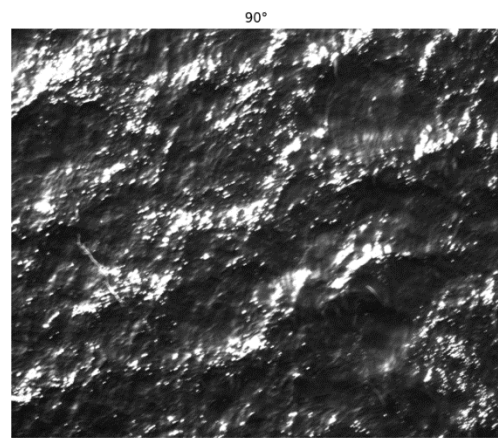
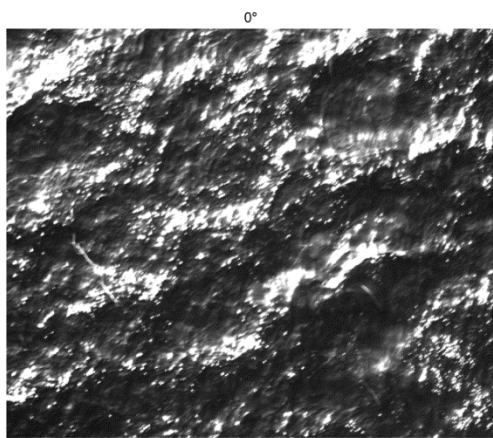
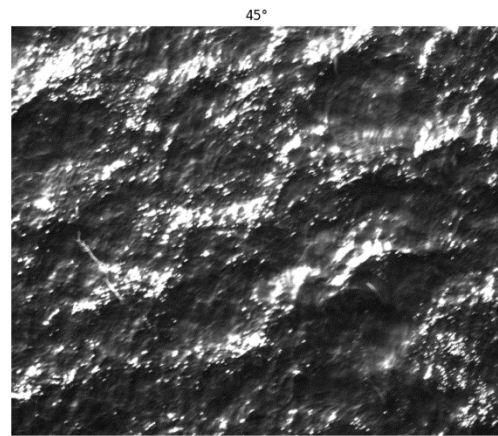
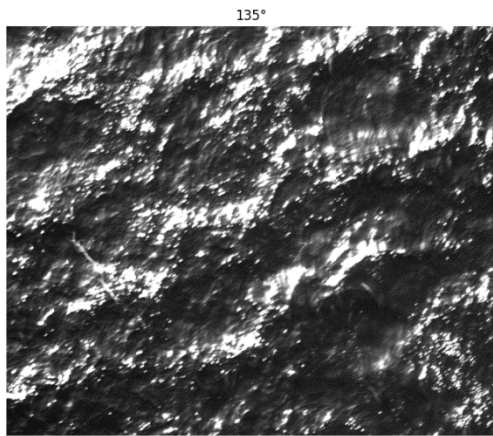


Bild 23: Beispielhafte Polarsens-Bildaufnahme einer Welle in der Kieler Förde bei seitlicher Sonneneinstrahlung. Diese sehr kompliziert strukturierte „Kappelwelle“ stellt die Herausforderung an die Entzerrung dar.

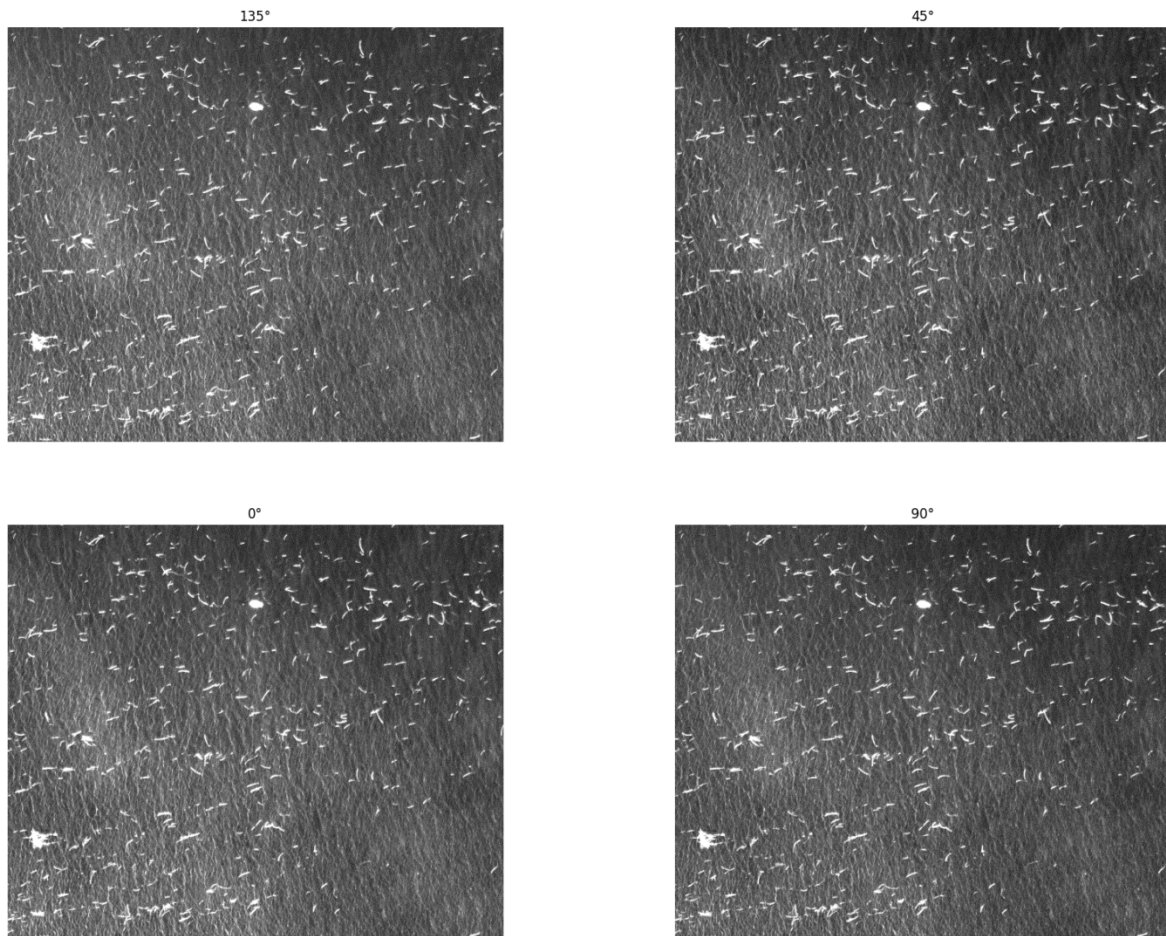


Bild 24: Beispielhafte Polarsens-Bildaufnahme mit Seegrass auf der Wasseroberfläche.

2.1.7. Flugkampagnen Aussteuerung, Kalibrationsmessungen

Die Ergebnisse der Messkampagne im September 2023 an der Ostsee bei Kiel hatten bereits gezeigt, dass insbesondere im küstennahen Bereich die Wellenbewegungen und Wellengeometrien, selbst bei kleinen Windgeschwindigkeiten von 2 – 3 B, die Erfassung der Seebodengeometrien und die spektrale Tiefenabschätzung deutlich erschweren bzw. unmöglich machen. Die verschiedenen Wellenbewegungen durch Wind und Brandung im ufernahen Bereich führen zu einer Überlagerungswind- und wellenspezifischem Bewegungsmuster, das auch durch eine Kenntnis der Geometrien nicht korrigierbar ist (Bild 18: ufernahe Wellengeometrien). Somit ist weder eine zuverlässige „spektrale Tiefenabschätzung“ noch eine Abbildung von Objekten am Seegrund gewährleistet.

Ziel einer neuen Messkampagne 2024 musste es sein

- eine Messserie unter optimalen Bedingungen hinsichtlich Wind- und Wellenbewegungen durchzuführen
- diese Messungen bereits unter radiometrisch ungünstigen Bedingungen am frühen Morgen bei niedrigem Sonnenstand zu beginnen, da hier typischerweise Wind- und Wellenbewegungen deutlich reduzierter sind als mit beginnender Thermik durch die tägliche Sonnenstrahlung
- möglichst im Verlauf der Messungen über den Messtag hinweg Daten bei unterschiedlichen Sonnenständen und Bewölkungsstadien aufzuzeichnen, um Erfahrungen für eine möglichst breite

Anwendung bei unterschiedlichen Bedingungen zu sammeln (Flexibilität, Einsetzbarkeit im Vergleich zu Satellitendaten, Minimierung des Einsatzrisikos, Ermittlung von Kosten und Risiken).

Die Flugkampagnen wurden am 24. August 2023 in Friedrichsort bei Kiel und am 20. Juni 2024 bei Neuendorf, 10 km nördlich von Bremerhaven durchgeführt. Als superspektrales Kamerasystem wurde in beiden Fällen die Toucan Silios CMS-C4 mit einem Objektiv von 25 mm Brennweite eingesetzt.

Tabelle Flugkampagnen 2023 / 2024

	24.08.2023	20.06.2024
Flugzeit (MEZ)	12:00 – 14:50	15:18 – 15:27
Sonnenstand	48 ° - 41°	48°
Wolkenbedeckung *	30% diffus	30% diffus
Messzeit (Min.)	15 min	9 min
Flughöhe	50 m	50 / 80 / 100 m
Flugstreifen	3 x 2	3 x 1
Fluggeschwindigkeit	10 m/sec	10 m/sec
Wind (m/sec)	3 m/sec	0 – 1 m/sec
Bildfolge	2 / sec	2 / sec

*es handelt sich in beiden Fällen um diffuse Sonneneinstrahlung durch eine gleichmäßige dünne hochliegende Wolkenschicht (Halbschatten, Cirrostratus)

Tabelle: Ground Truth und parallele Messungen zur Flugmesskampagne

Messkampagne	08/2023	06/2024
Testgebiet	Friedrichsort / Kiel	Neuendorf / Bremerhaven
Übersichtskartierung mit Minidrohne RGB Kamera	-	+
Kalibrationstargets*	1 / 20 / 50%	1 / 5 / 20 / 50%
Spektrometer Messungen Radiance + Irradiance	-	+
Unterwasservideo im Flachwasserbereich	-	+
Messung Himmelsstrahlung	-	+
Aufnahme Bewölkung	-	+
Turmmessungen	-	+

*Kalibrationsflächen 80 x 80 cm, beschichtet mit Speziallack mit 1 / 5 / 20 / 50% Reflexionsgrad

Ergebnisse der Kampagne in Friedrichsort / Kiel

Die Beleuchtungsbedingungen waren durch eine variable Dichte der Wolkenschicht einigen Schwankungen unterworfen, die eine optimale Aussteuerung der Toucan Silios mit nur 8 bit radiometrischem Datenvolumen sehr schwierig machten, was auch zu einer Übersteuerung der Spektralkanäle der 20%- und 50%-Kalibrationstargets in mehreren der Spektralkanäle führte. Die Windgeschwindigkeit von im Mittel 3 m / sec war zusätzlich böigen Schwankungen unterworfen. In

Böen ergaben sich auch Wellenbewegungen mit 2 überlagernden Bewegungsmustern, was ein „spektrale Tiefenmessung“ erschwerte und teilweise zu einer deutlichen Erhöhung des Messfehlers führte. Mit Hilfe von multitemporalen Flügen konnten dennoch Tiefenabschätzungen durchgeführt werden und auch Strukturen in den Bildinhalten erfasst werden (siehe Bericht EOMAP).

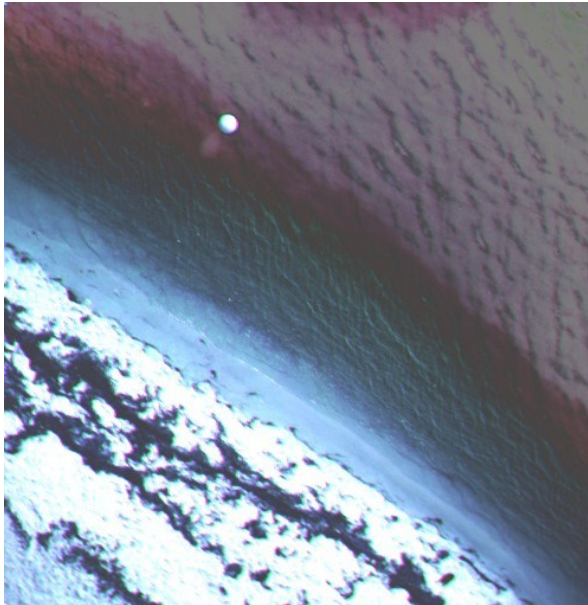


Bild 25: Auswertung RGB Kanal 4 2 8

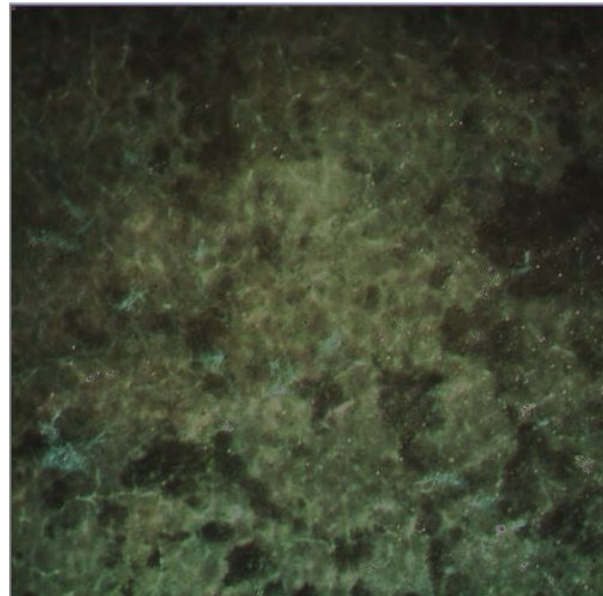


Bild 26: Strukturen durch Vegetationsbewuchs im Bereich von 1 – 2 m Tiefe

Im Bild 25 links sind die spektralen Effekte entsprechend der zunehmenden Wassertiefe in einer Kanalkombination RGB 4 2 8 (560nm/480nm/780nm) gut zu erkennen, im Bild 26 rechts typische Strukturen durch Vegetationsbewuchs am Seeboden.

Die „superspektrale Gewässertiefenabschätzung“ der Daten ist im Bericht der Fa. EOMAP enthalten.

Ergebnisse der Kampagne in Neuendorf / Bremerhaven

Die Wetterbedingungen waren zu Beginn des Messtages optimal, wolkenfrei und mit extrem hohen Sichtweiten und minimalem Aerosolgehalt. Bereits zu Beginn der Untersuchungen wurde gegen 9:30 Uhr eine Übersichtsaufnahme mit einer Minidrohn (DJI Mini 4) geflogen, um optimale Flugpfade auszuwählen und aus der geplanten Perspektive der Toucan Silios die Zielbereiche zu optimieren (Wasserpflanzen, mögliche Trübestrome).

Bild 27 Seite 27 zeigt die Lage des Kalibrationstargets und die Messeinrichtung (Stativ) zur Erfassung der einfallenden und reflektierten Strahlung (DLR). Ein Mitarbeiter des DLR erzeugt mit einer GoPro Kamera an einer langen Stange die Unterwasservideos bezüglich Pflanzenwachstum und Topographie des Seebodens, der später vom DLR nochmals mit Messstangen entlang der ausgewählten Profile vermessen wurde.

Bei einem Sonnenstand zwischen 40° und 45° wurden innerhalb von 9 Minuten 3 Profile wie geplant in 3 Flughöhen aufgezeichnet, die Aussteuerung der Toucan Silios konnte wie gewünscht den spektralen Bereich der 3 Kalibrationstargets (1, 5, 20%) und die Wasserflächen abdecken.

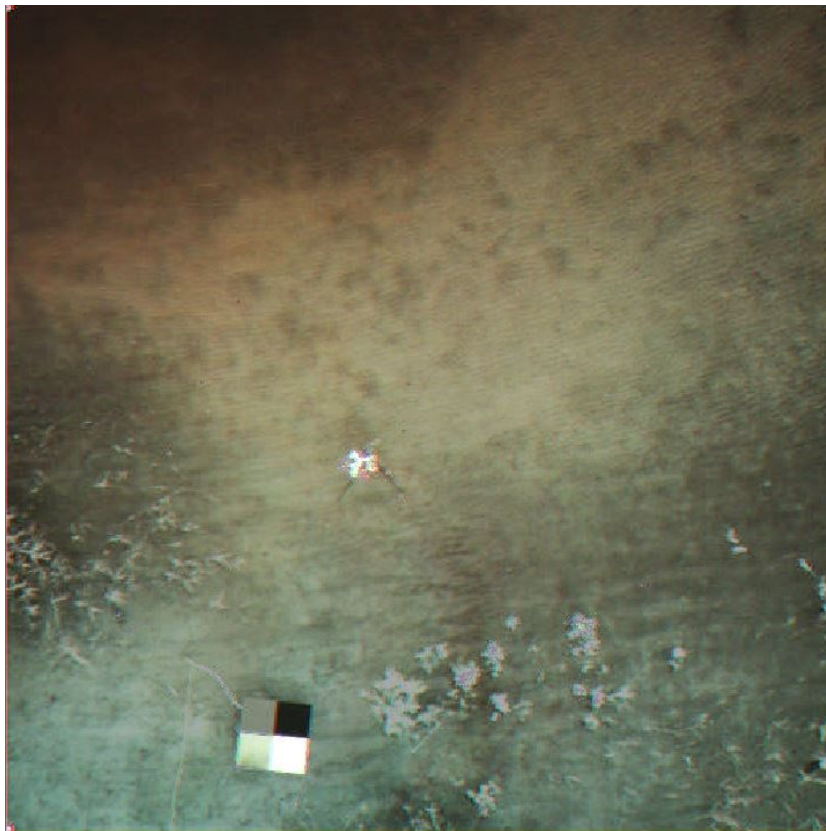


Bild 27: Aufnahme mit der Toucan aus 50m Höhe in einer RGB Kanalkombination 3 5 6 (520nm, 610nm, 680nm), Wassertiefe im Bild unten 20cm, im Bild oben ca. 3m.

2.1.8. Technologieoffene Suche nach Lösungen zur Befriedigung zukünftiger Bedürfnisse der Kunden

Die Technologie und die Einsatzmöglichkeiten von Drohnen und Sensorik haben sich in den letzten Jahren stark verbessert betreffend

- Genehmigung und Zulassung von UAV – Flügen
- UAV-Angebot, Preise und Verfügbarkeit (Quadro-, Hexa-, Oktokopter, VTOLS)
- Navigation, Lagegenauigkeit, Flugführung und Logistik

Die Beschränkungen für Fluggenehmigungen von UAVs im Außenbereich und insbesondere für maritime Anwendungen im Küstenbereich sind inzwischen klar definiert und vereinfacht. Dies betrifft auch Systeme in der Gewichtsklasse über 5 kg, die früher in der Einstufung bis 25 kg zusammengefasst waren.

Unklarheiten und umfangreiche Genehmigungsverfahren führten früher zu einer Konzentration auf möglichst kleine und kompakte Systeme, was zu einer Konzentration ingenieurtechnischer Anwender auf Systeme im Bereich des Gesamtgewichtes von 1,5 – 3 kg geführt hatte. Dies ging natürlich auch zulasten von Gewicht und Qualität der Nutzlasten (Kameras, Sensorik, Navigation, Datenübertragung für Echtzeitanwendungen).

Multisensorische Nutzungen, z.B. die Kombination verschiedener Kamerasysteme und Spektralbereiche (RGB-, Wärmebild-, Superspektral-, Hyperspektral-Kamera) waren durch diese Beschränkungen und Kostenhürden zumeist ausgeschlossen.

Verbunden mit diesen Einschränkungen waren auch Einsatzzeit und Reichweite der Drohnensysteme, die damit zumeist nur im lokalen Umfeld (1 – 2 km maximal, Sichtbereich) und kurzzeitig (20 – 30 min. Betriebszeit) eingesetzt werden konnten.

2.1.9. Zusammenfassung

Die in den beschriebenen Experimenten mit kleinen, kompakten und sehr leichten Kameras und UAVs durchgeführten Verfahren zur superspektralen Analyse der Bathymetrie im Ufer- und Flachwasserbereich sind für kleine und lokale Einsatzgebiete geeignet. Hier können mit geringstem Aufwand für viele Fragestellungen gute Ergebnisse erzielt werden, die mit Flugzeugbefliegungen ein Vielfaches an Aufwand erfordern würden. Die superspektrale bathymetrische Analyse kann prinzipiell nur bis zu einer Wassertiefe von ca. 0.8 Secchi-Tiefen funktionieren, was in Anbetracht von möglichen Schwebstoffen im Wasser und insbesondere bei organogenen Bestandteilen im Süßwasser (Seen, Flussläufe) das Verfahren häufig auf geringe Wassertiefen einschränkt (1-2m). Trotzdem ist es aus Nutzersicht ein sehr kostengünstiges Messprinzip, das mit Investitionen im Bereich von 20 – 30 k€ finanzierbar ist. Mit Hilfe des Verfahrens können Satellitendaten von Küstenzonen und Uferbereichen in der Genauigkeit stark verbessert werden oder z.B. Sturmschäden und Sedimentabtrag im Uferbereich besser erfasst werden. Auch oberflächennahe Hindernisse für die Schifffahrt oder Havarien von Kabeln und Leitungen an der Küste sind zumindest zu einem Teil ufernah sichtbar zu machen.

Die günstigen und kleinen Kameras für Minidrohnen und kleine UAVs erfahren dabei natürlich deutliche Begrenzungen der Flächenkapazität durch die geringe Taktfrequenz, die kleine, zulässige Fluggeschwindigkeit der Kameras (Verschmierung, SNR) und die geringen Flächenleistung der UAVs (geringe Einsatzzeiten). Viele Einzelaufnahmen müssen lagegenau zu Mosaiken verarbeitet werden, was sicherlich oft fehlerbehaftet, aufwendig und nicht vollständig automatisierbar ist. Zusätzlich führt die geringe Flächenkapazität zu einer langen Messdauer bei wechselnden atmosphärischen Bedingungen und Beleuchtungsgeometrien, was neben den hohen Aufwänden Ursache fehlerhafter Auswertungen sein kann.

Für die ingenieurtechnischen Anwendungen (Sturmschäden, Küstenveränderungen, hohe Wasserstände durch Klimaveränderungen und weltweite Planung des Rückbaus von Küstenstädten, Erfassung von Militäraltlasten), weltweite Umwelt- und Bedrohungsanalysen und die Nutzung zur Kalibration von Satellitendaten sind Systeme mit einem deutlich größeren Einsatzradius und einer großen Flächenleistung gefragt.

2.1.10. Ausblick

UAVs und Aufnahmesysteme für regionale Fragestellungen sind gefragt, die Messprofile von 100 km und mehr aufnehmen können und zur Aufnahme eines größeren Testgebietes oder während einer Bedrohungslage mehrere Stunden in der Luft sein können. Dazu zählen z.B. in der Umwelt- und Klimaforschung die Aufnahme von Wasserfarben, Temperatur- und Salinitätsprofilen regionaler Küstenzonen und Meeresarme ([10] Lehmann et al. 2024), zur Unterstützung der Auswertung von

Umweltsatellitendaten, die häufig nur eine räumliche Auflösung im Bereich einiger 100m bis km haben um eine entsprechend regionale oder überregionale simultane Abbildung subkontinentaler Flächen zu gewährleisten.

Notwendig zur Befliegung sind hier Systeme mit VTOL-Eigenschaften, die z.B. von Messschiffen aus eingesetzt werden können oder mit Fahrzeugen schnell in Einsatzgebiete bewegt werden können. Anzustreben ist für die küstennahe Bathymetrie und die Analyse des Seebodens die Kombination sensitiver Multi-Kamerasysteme in Kombination mit kompakten Lasersystemen, wobei das Gewicht bei Multisensorsystemen häufig bauartbedingt zwischen 5kg und 10kg liegt.

OptoPrecision GmbH hat mit der VT4 (Bild 28) ein System entwickelt, das diesen Anforderungen entspricht.



Bild 28: VTOL UAV VT4-Rochen von OptoPrecision mit einer Sensortragfähigkeit von 12 kg und einer Flugzeit von ca. 6 Stunden.

2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Projekt hatte ein Budget von 1.022.400 Euro und wurde mit einer Quote von 60% durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert. Im Wesentlichen wurde das Budget für Personalkosten benötigt.

Für dieses Projekt wurde eine Toucan-Kamera als Investition beschafft. Darüber hinaus konnte auf Fluggeräte von OptoPrecision kostenfrei zugegriffen werden, so dass nur Verbrauchsmaterial im überschaubaren Umfang benötigt wurde.

Das Reisekostenbudget wurde aufgrund der Covid19-Pandemie nur zu einem geringeren Teil für die Messkampagnen gebraucht.

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Wie in Kapitel 2.1 dargestellt wurden umfangreiche Arbeiten durchgeführt, um die Präzision der errechneten geo-referenzierten Daten im Flachwasserbereich signifikant zu erhöhen.

Dabei wurden alle störenden Umwelteinflüsse beim Übergang vom Laborexperiment in die reale Flachwasserzone betrachtet, vermessen und analysiert. Dieser Übergang wird von einer Vielzahl von Faktoren, wie dem Wetter, Beleuchtungszustand durch Sonnenstand und Wolken, dem Bewegungszustand der Wasseroberfläche (Wind) und den Schwebstoffen im Wasser und direkt in der Wasseroberfläche stark beeinflusst. Dies lässt sofort erahnen, dass die Bearbeitung dieser Herausforderungen nur im Team mit ausreichend Ressourcen möglich ist.

Auch die Wechselwirkung mit gegenwärtig verfügbaren Fluggeräten und zukünftig möglicherweise verfügbaren Fluggeräten wurde betrachtet um die zukünftigen Bedarfe für Monitoring in Flachwasserzonen möglichst zielgerichtet und effizient bedienen zu können. Insbesondere durch die Einbettung des Projektes in die Gesamtstrategie von OptoPrecision ist es hochwahrscheinlich, dass das aufgebaute Expertenwissen zu Folgeprojekten und kommerziellen Aufträgen führen wird.

Diese Arbeiten wären ohne die Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz nicht möglich gewesen.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Das Projekt hat den Blick auf die Komplexe Wechselwirkung zwischen Umwelt- bzw. Einsatzbedingungen, Sensorik und Fluggerät wesentlich geschärft. Die im Projektantrag formulierte Segmentierung des Marktes in drei Leistungs- bzw. Preisklassen: Hoheitliche Bedarfsträger, Survey-Industrie und Offshore Bauindustrie gilt aus heutiger Sicht nach wie vor.

Aufgrund der Komplexität der Umwelteinflüsse, Flugführung und Genehmigungsverfahren ist jedoch davon auszugehen, dass die komplette Dienstleistung der Erzeugung eines geo-referenzierten Datenproduktes mehr angefragt werden wird, als der Verkauf von Sensor Hardware und Fluggeräte.

Daher wird sich OptoPrecision gemeinsam mit den Partnern weiterhin auf die Schaffung eines modularen Systems aus Sensoren und Fluggeräten konzentrieren und auch deren Einsatz als Dienstleistung mit anbieten.

2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Ergebnisse verschiedener Arbeitsgruppen zeigen, dass in den letzten 4 Jahren häufig von Forschungseinrichtungen und Ingenieurbüros kleine UAVs (<2 kg) zusammen mit superspektralen Kameras vom Typ MAIA und Toucan Silios zur Erfassung der ufernahen Bathymetrie und Umweltanalyse eingesetzt wurden. Da üblicherweise sehr kleine UAVs mit einem geringen Einsatzradius Trägersysteme waren, waren auch die vermessenen Flächen sehr klein, zumeist in der Größenordnung von wenigen Quadratkilometern.

Neben der superspektralen Analytik mit Kleindrohnen wurden auch erste UAV-Systeme mit Kleinlasersystemen entwickelt, die mit einem Punktabstand von 1 – 4 qm zur Tiefenvermessung etwas größerer Gebiete (10 – 20 qkm) geeignet sind. Diese Systeme liegen in der Gewichtsklasse zwischen 12 – 25 kg, und benötigen häufig eine Startbahn oder Katapultlösung, und können somit nicht flexibel im Gelände oder von Bord von Schiffen eingesetzt werden.

Hersteller schwerer flugzeuggetragener Laser-Bathymetrie-Systeme wie die Fa. Riegl oder Teledyne haben in der nahen Vergangenheit begonnen, kompaktere Laser/Kamera-Bathymetrie-Systeme zu entwickeln, die von Kleinhelikoptern oder sehr großen UAVs einsetzbar (Startbahn erforderlich) sind und eine entsprechende Logistik und einen entsprechenden Kosteneinsatz erfordern. Die räumliche Auflösung der Systeme reicht bis in den Submeterbereich, die Eindringtiefe in Wasser bis 1,5 Secchi.

Möglicherweise sehr interessant für unsere Zielgruppe staatlicher, sicherheits-, umwelt- und ingenieurtechnischer Nutzer ist eine Entwicklung des Fraunhofer-Instituts in Freiburg, die ein kompaktes abbildendes Lasersystem zur bathymetrischen Vermessung von Wasserkörpern entwickelt haben, das mit ca. 3 kg auf größeren UAVs einsetzbar ist und in der vorhandenen Konfiguration bis ca. 50 m Flughöhe eingesetzt werden kann. Das Nachfolgesystem soll bei 100 – 150 m Einsatzhöhe Tiefenprofile bis 1,5 Secchi Wassertiefe messen, bei einer räumlichen Auflösung von 1 Punkt / qm. Beide Systeme wären auf dem VTOL von OptoPrecision einsetzbar.

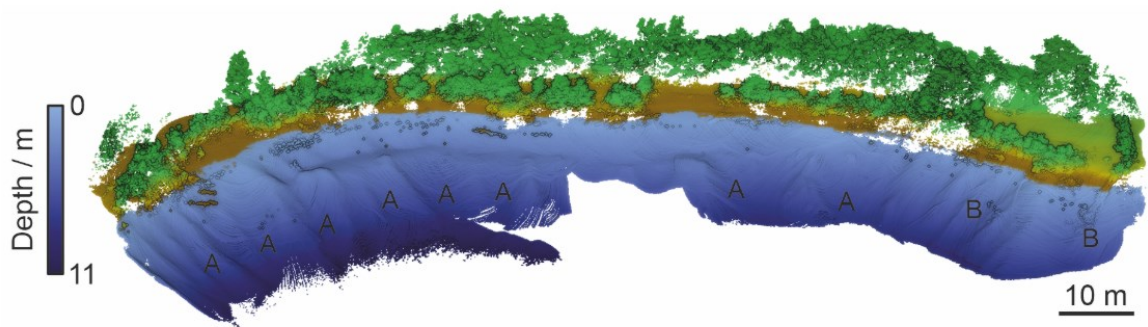


Bild 29: zeigt ein Mosaik eines Sees vom Flachwasserbereich bis zu einer Tiefe von 8 m, aufgenommen mit dem Laserscanner des FHG Institutes in Freiburg [11].

Die Kombination des Lasersystems mit einem superspektralen Kamerasystem hoher räumlicher und spektraler Auflösung (ca. 5 cm Auflösung, 6 – 8 Spektralkanäle, 30 – 60 nm Bandbreite, 2 – 8 Mpixel) könnte ein breites Anwendungsfeld in der Erkundung der Wasserwege und Küstenzonen finden, insbesondere, wenn ein kompaktes und flexibles VTOL mit regionalem Einsatzprofil als Träger vorhanden ist.

2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Ergebnisse und Fähigkeiten aus dem Projekt wurden erstmals am Leibniz Centre for Tropical Marine Research in Bremen auf dem Workshop:

Unlocking the potential of consumer-grade drones for marine research 25-28th June, 2024, Bremen, Germany

Titel: Frank Lehmann, Martin Nägele, Markus Peichl, Future Drone- and Multi-Sensor-Based Remote Sensing of Near-Coastal Ocean Regions for Improved Oceanographic Parameter Extraction on a Regional Scale, Unlocking the potential of consumer-grade drones in marine research, Workshop, Bremen 26-28 June 2024

vorgelegt. So konnte zunächst die Aufmerksamkeit der wissenschaftlichen Community gewonnen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Specht, B. Szostak, O. Lewicka, A. Stateczny und C. Specht, „Method for determining of shallow water depths based on data recorded by UAV/USV vehicles and processed using the SVR algorithm,“ *Measurement*, 2023.
- [2] P. Agrafiotis, D. Skarlatos, A. Georgopoulos und K. Karantzas, „Shallow Water Bathymetry Mapping from UAV Imagery based on Machine Learning,“ *CoRR*, 2019.
- [3] L. Rossi, I. Mammi und F. Pelliccia, „UAV multispectral images for bathymetry estimation,“ in *IMEKO TC-19--International Workshop on Metrology for the Sea, Genoa*, 2019, pp. 119-124.
- [4] „Maia,“ SAL Engineering, 07 2024. [Online]. Available: spectralcam.com/maia-tech/.
- [5] „Slios Website - Toucan Camera,“ Slios, 07 2024. [Online]. Available: slios.com/toucan-camera.
- [6] G. A. Atkinson und J. D. Ernst, „High-sensitivity analysis of polarization by surface reflection,“ Springer-Verlag, 2018.
- [7] „Wikipedia - Kugelkoordinaten,“ 07 2024. [Online]. Available: de.wikipedia.org/wiki/Kugelkoordinaten.
- [8] E. Peters, J. Schmidt, M. Anders, R. Berger und D. Brandt, „Schlussbericht des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR); REMAP: Experimental investigations,“ 2024.
- [9] E. Peters, G. A. Atkinson und M. Stephan, „Correcting the view through the water surface by recovery of surface normal orientations using polarization imaging,“ in Vorbereitung.
- [10] F. Lehmann, M. Nägele und M. Peichl, „Unlocking the potential of consumer-grade drones for marine research,“ in *Future Drone- and Multi-Sensor-Based Remote Sensing of Near-Coastal Ocean Regions for Improved Oceanographic Parameter Extraction on a Regional Scale*, Bremen, Leibniz Centre for Tropical Marine Research, 2024.
- [11] „Fraunhofer Unterwasser-Topographie-Bathymetrie,“ IPM Fraunhofer, 07 2024. [Online]. Available: ipm.fraunhofer.de/de/gf/objekterfassung-laserscanning/anw/unterwasser-laserscanning/unterwasser-topographie-bathymetrie.html.