

## BMWK-gefördertes Verbundprojekt

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Schlussbericht des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)

<b>Förderkennzeichen</b>	03SX551B
<b>Thema</b>	REMAP: Experimental investigations
<b>Thema des Verbunds</b>	Rapid Environmental Monitoring via Airborne optical Platforms (REMAP)
<b>Durchführung</b>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für den Schutz maritimer Infrastrukturen, Institut für Optische Sensorsysteme
<b>Projektleitung</b>	Dr. Enno Peters
<b>Laufzeit</b>	01.07.2021 - 31.12.2023
<b>Berichtszeitraum</b>	01.07.2021 - 31.12.2023
<b>Datum</b>	Juni 2024
<b>Mit Beiträgen von</b>	Enno Peters, Jendrik Schmidt, Max Anders, Ralf Berger, David Brandt
<b>Verbundpartner</b>	EOMAP GmbH & Co. KG OptoPrecision GmbH

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 03SX551B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

## Inhaltsverzeichnis

1. Kurze Darstellung .....	3
1.1 Aufgabenstellung.....	3
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	4
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	5
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	6
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
2. Eingehende Darstellung .....	9
2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele .....	9
2.1.1 Point Spread Function (PSF) .....	9
2.1.2 Polarisationsuntersuchungen und -experimente.....	20
2.1.3 Umweltmessungen und Ground-Truth (speziell Sonar-Abtastung des Meeresbodens) .....	33
2.1.4 Konzeptarbeit zur Georeferenzierung und Mosaikierung .....	40
2.2 Wichtigste Positionen des Zahlenmäßigen Nachweises .....	44
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	44
2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	45
2.4.1 Erreichung der Ziele im Verwertungsplan.....	45
2.4.2 Fortschreibung und Ausblick .....	46
2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	46
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses .....	46
3. Liste der verwendeten Abkürzungen .....	47
4. Literaturverzeichnis.....	47

# 1. Kurze Darstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

### **Einordnung ins Verbundprojekt REMAP:**

Im Verbundprojekt REMAP ging es darum, ein Drohnen-getragenes multispektrales Kamerasystem zur Messung der Seegrundtiefe zu entwickeln, basierend auf Strahlungstransportrechnungen in der Atmosphäre und im Wasser. Ähnliche Algorithmen werden bereits erfolgreich auf Satellitendaten zum gleichen Zweck eingesetzt. Neben der Multispektralkamera, auf dessen Daten das eigentliche Retrieval basiert, sollte eine Polarisations-Sensitive Kamera (PolarSens) eingesetzt werden, mit dem Ziel aus der gemessenen Polarisationsrichtung die lokale Neigung der Wasseroberfläche pixelgenau zu berechnen. Die Neigung der Wasseroberfläche ist ein wesentlicher Einflussfaktor für die Intensität des von der Multispektralkamera empfangenen Lichts und damit für die Strahlungstransportsimulation zur Bestimmung der Seegrundtiefe.

Die Aufgabenteilung im Verbundprojekt lässt sich grob folgendermaßen zusammenfassen:

- EOMAP: Algorithmen-Entwicklung und Datenauswertung
- OptoPrecision: Instrumentenentwicklung und Drohne
- DLR: Physikalische Experimente und Grundlagenuntersuchungen sowie Aufnahme der Ground Truth

### **Aufgabenstellung im Einzelprojekt:**

Das hier dargestellte Teilprojekt „REMAP: experimental investigations“ wurde von zwei DLR-Instituten durchgeführt, dem Institut für Optische Sensorsysteme (OS) in Berlin und dem Institut für den Schutz Maritimer Infrastrukturen (MI) in Bremerhaven.

Die Hauptaufgaben im Teilprojekt waren Experimente, Analysen und physikalische Grunduntersuchungen zu den entwickelten Methoden im Verbundprojekt, Charakterisierungen und Kalibrierungen von eingesetzten Komponenten (z.B. PolarSens-Kamera) und die Aufnahme der „Ground Truth“ zur Validierung des Gesamtsystems. Eine weitere Aufgabe waren Umweltmessungen, insbesondere Radianz-Messungen und die spektrale Absorption des Wassers, die zur Charakterisierung während Felderprobungen benötigt wurden. Eine Aufgabe speziell des DLR-OS war das Einbringen von Know-how, Unterstützung und Hilfestellung bei der Auslegung und Kalibration, sowie bei der Konzepterstellung für eine echtzeitfähige Georeferenzierung und Mosaikierung von Luftbildverbänden für bathymetrische Kartierungen, da hier auf langjährige Erfahrung in der Arbeit mit luftgestützten Kamerasystemen zurückgegriffen werden kann.

Spezielle Aufgaben lieferten sowohl Ergebnisse und Mehrwerte für das Verbundprojekt, als auch darüber hinaus:

Eine Hauptaufgabe und Ziel nach dem SMART-Prinzip bestand in umfangreichen Messungen der Point Spread Function (PSF), die für das bekannte „Verschwimmen“ von Aufnahmen unter Wasser verantwortlich ist und die Verschmierung eines Punktes durch Streuung beschreibt. Um einen größtmöglichen Nutzen und wissenschaftlichen Mehrwert zu schaffen, sollten diese Messungen als Funktion der Lichtwellenlänge, Partikel-Konzentrationen und bei unterschiedlichen Gewässertypen durchgeführt und interpretiert werden. Innerhalb des REMAP Verbundprojektes dienen diese Daten der Abschätzung, ob und wie groß der Einfluss der PSF auf Messungen des Drohnen-getragenen Systems in typischen Anwendungsszenarien ist. Über REMAP hinaus können die PSF-Messungen aber auch einen Mehrwert für Aufnahmen von optischen Unterwasser-Sichtsystemen z.B. an ROVs (remote

operated vehicles) liefern, da eine Entfaltung mit bekannter PSF solche Bilder nachschärfen bzw. korrigieren kann.

Eine weitere Kernaufgabe betraf die Berechnung der lokalen Neigung der Wasseroberfläche aus Daten der PolarSens-Kamera. Mit physikalischen Vorversuchen und Experimenten war die Grundüberlegung zu verifizieren und gemeinsam mit dem Projektpartner OptoPrecision eine entsprechende Methode zu erarbeiten. Wichtig hierfür war die Untersuchung, wie sich der Beitrag von Licht aus dem Wasserkörper von dem Beitrag des an der Oberfläche reflektierten Himmelslichts trennen lässt. Dies ist wichtig, da die beiden Komponenten durch Brechung bzw. Reflexion unterschiedlich polarisiert werden. Mit Hilfe von gleichzeitigen Umweltmessungen während Feldtests sollte herausgefunden werden, unter welchen Wetterbedingungen die Methode funktioniert und wie die Genauigkeit der berechneten Oberflächenneigung ist. Diese Arbeiten liefern gleichzeitig aber ebenfalls Ergebnisse über REMAP hinaus, da Bilder des Seegrundes eine Verzeichnung durch die Brechung an der Oberfläche erfahren, wenn diese nicht glatt ist, was beispielsweise bei Wellengang der Fall ist. Mithilfe der Kenntnis der lokalen Neigung der Oberfläche kann diese Verzeichnung korrigiert werden.

Thematisch gliedern sich die Beiträge im Teilprojekt „REMAP: experimental investigation“ in vier Bereiche, deren Ergebnisse in Kapitel 2.1 detailliert beschrieben sind:

- Point Spread Function (PSF)
- Polarisationsuntersuchungen und -experimente
- Umweltmessungen und Ground-Truth
- Konzeptarbeit zur Georeferenzierung und Mosaikierung

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Forschungsgruppe „Technologieerprobung“ (TES) des DLR-Instituts für den Schutz maritimer Infrastrukturen (DLR-MI) verfügt über ein autonomes Unterwasserfahrzeug (AUV) des Typs „Seekatze“ von der Firma Atlas Elektronik. Das AUV ist mit Sonarsystemen ausgestattet, die eine Abtastung des Meeresbodens gestattet. Die Gruppe Technologieerprobung verfügte bereits über Expertise und geschultes Personal im Umgang mit der Seekatze und hatte sie erfolgreich auf verschiedenen Felderprobungen eingesetzt, beispielsweise zur Kartografie von Schiffswracks oder Altlasten. Die Sonarsysteme der Seekatze eignen sich, um Tiefenprofil-Karten (Bathymetrie) des Meeresuntergrunds zu erstellen, wie sie erforderlich sind, um eine „Ground Truth“ für das in REMAP zu entwickelnde Drohnen-getragene multispektrale Kamera-System zur Bestimmung der Seegrundtiefe bereitzustellen. Ebenso stand das für den Betrieb des AUVs benötigte Equipment und Hilfsmaterial, inkl. Transport und kleinem Schlauchboot mit Außenborder, zur Verfügung und konnte eingesetzt werden.

In der wissenschaftlichen Arbeitsgruppe „Sensorik“ (SEN) des DLR-MI stand geeignetes wissenschaftliches Personal zur Verfügung für die Auswahl und Beschaffung notwendiger Instrumente und Equipments für Umweltmessungen bzw. zur Aufnahme von Umweltparametern während Felderprobungen (Ground Truth) sowie während der durchgeführten Grundlagenexperimente (Point Spread Function und Polarisationsexperimente) im Labor und Feld. In der Hauptsache betraf dies zwei Radiometer für Lichtmessungen unter Wasser und eine Polarisations-Sensitive (PolarSens) Kamera.

Ebenfalls stand geeignetes technisches Personal für Konstruktionszeichnungen und die Fertigung mechanischer Bauteile zur Verfügung, die notwendig waren zur Aufnahme und Justage von Instrumenten, z.B. an Unterwasserplattformen für die Feldexperimente.

Ein Unterwasser-Transmissionsmessgerät, das die spektrale Attenuation von Licht unter Wasser misst, stand bereits zur Verfügung und konnte im Projekt REMAP eingesetzt werden, ohne Investitionen zu verursachen.

Das Institutsgebäude des DLR-MI in Bremerhaven ist unmittelbar an einem Hafenbecken gelegen und verfügt über eine Dachplattform mit nahezu freier Rundum-Sicht, auf der wissenschaftliche Instrumente zur Bestimmung von Umweltparametern installiert werden können wie beispielsweise Spektrometer für die Vermessung des einfallenden Himmelslichts. In diesem Setup wurde ein Großteil der Freiluft-Grundlagenexperimente durchgeführt, z.B. die Charakterisierung der Polarisationsexperimente in Abhängigkeit der einfallenden Strahlung (Peters et al., in prep.).

Es stand begrenzte Expertise im Bereich von Point Spread Function (PSF)-Messungen und deren Einfluss auf die Lichtstreuung unter Wasser zur Verfügung. Es war erklärtes (SMARTEs) Ziel des Teilprojekts „REMAP: experimental investigations“, diese Expertise zu stärken und auszubauen. Ebenfalls konnte auf Erfahrungen in der Entwicklung von optischen Instrumenten für den Unterwasserbereich zurückgegriffen werden (Schmidt2022).

Es stand ebenfalls eine begrenzte Expertise in der Nutzung und Arbeit mit polarisierter Strahlung zur Verfügung. Diese betraf aber in erster Linie die Entwicklung von optischen Instrumenten zur Sichtverbesserung. Hier blickte insbesondere SEN auf eine Forschungshistorie zurück, in der ein solches Instrument mit aktiver LED-Beleuchtung im Short-wave-Infrarotbereich SWIR (Mischung2022) mit Polarisationsoptiken ausgestattet und so die Rückstreuung an Rauch- und Nebelpartikeln reduziert wurde, um Überblendung bzw. Sättigung von Pixeln zu verhindern (Peters2023). Im Gegensatz dazu geht es in REMAP um die Entwicklung von Methoden zur Berechnung der lokalen Neigung der Wasseroberfläche aus Messungen einer PolarSens-Kamera. Es war erklärtes (SMARTEs) Ziel, Expertise im Bereich der Nutzung polarisierter Strahlung im maritimen Kontext auszubauen.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die genaue Aufteilung nach Arbeitspaketen ist dem Projektantrag zu entnehmen.

Der Ablauf des DLR-Teilprojekts REMAP: experimental investigations richtete sich stark nach dem gemeinsamen Verbundprojekt REMAP, das in zwei Phasen gegliedert war. In Phase 1 wurden physikalische Grundüberlegungen verifiziert und technische Schlüsselkomponenten getestet. In dieser Phase liefen die Aktivitäten im Teil- und Verbundprojekt weitgehend parallel. In Phase 2 lag der Fokus der Industriepartner auf der Realisierung des Demonstrators (siehe Leit Antrag). In dieser Phase gabelten sich die Aktivitäten im DLR-Teilprojekt: Einerseits wurden mit Umwelt- und Ground Truth-Messungen Felderprobungen und Experimente im Verbundprojekt direkt unterstützt. Andererseits liefen detaillierte Methodenuntersuchungen, physikalische Experimente sowie Charakterisierungen der eingesetzten Hardware weiter und lieferten Genauigkeitsanalysen und Optimierungen.

Als Beispiel wurden in Projektphase 1 die Initialuntersuchungen und Feldexperimente mit der PolarSens-Kamera gemeinsam von OptoPrecision und dem DLR vorgenommen. Dann ging die Entwicklung in Phase 2 bei OptoPrecision in Richtung Installation und Einsatz von der Drohne aus (siehe den Projektbericht von OptoPrecision für weitere Einzelheiten), während sich das DLR um Genauigkeitsabschätzungen, Kalibration und Analyse bei verschiedenen Umweltbedingungen kümmerte. Die Ergebnisse optimierten wiederum die Messgenauigkeit und lieferten Empfehlungen für den Einsatz der Methode.

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

### **Point Spread Function (PSF):**

Die Messprinzipien und Grundcharakteristiken der PSF sind seit längerem wohlbekannt. In der Vergangenheit wurden bereits umfangreiche Untersuchungen zur PSF in Küstengewässern, ozeanischen Gewässern und Hafengewässern durchgeführt (Voss1990, Mertens1977, McLean1991) an die mit dieser Arbeit angeknüpft wurde. Insbesondere Voss et al. hat sowohl Messungen in einem Laborbecken als auch Messungen über Entfernungen bis 27 m im Pazifischen Ozean, vor den Bahamas und in der Sargasso See durchgeführt.

Dabei stand in der Regel die Entwicklung von mathematischen Modellen (Voss1991) zur Beschreibung der PSF im Vordergrund. So auch bei den weit verbreiteten empirischen Modellen von Duntley et al. (Duntley1932) und Dolin et al. (Dolin2006). Der Großteil dieser Arbeiten schließt mit dem Modell-Vergleich und der weiteren Entwicklung eines eigenen Modells von Hou et al. (Hou2008) weitestgehend ab. Hervorzuheben ist, dass alle genannten Untersuchungen und Modelle auf der Untersuchung einer einzigen Wellenlänge im Grünen bei 532 nm beruhen.

Dies basiert auf der Annahme, dass Grünes Licht typischerweise den besten Kompromiss in einem breiten Spektrum von Gewässern zwischen idealer Transmission in Reinstwasser (Ozeanisch) und Trübere Gewässern (z.B. Küstengewässer) bietet (Jerlov1968, Solonenko2015). Diese Annahme trifft jedoch nicht für alle relevanten Gewässer zu. Gerade in der Deutschen Bucht ist der Anteil an Inhaltsstoffen regelmäßig so hoch, dass sich die Wellenlänge optimaler Transmission in den roten Bereich verschiebt (Barth1997).

Mit dem vermehrten Aufkommen von mehrfarbigen Systemen für die Bildaufnahme Unterwasser bzw. ins Wasser, wie sie im Zuge dieses Projekts durchgeführt wurde, fehlen Erfahrungswerte zum multispektralen PSF-Verhalten. Auf Basis oben genannter Modelle lassen sich die PSFs für andere Wellenlängen berechnen, jedoch fehlte ein tieferes Verständnis auf Basis empirischer Messungen und die Übertragbarkeit der Modelle auf andere Wellenlängen bleibt teilweise unklar. Neben der REMAP-Anwendung sind multispektrale PSF-Messungen ebenfalls von Interesse für aktuelle technologische und wissenschaftliche Herausforderung und Themen wie Hyperspektralkameras zum Lebensraum-Monitoring, der Archäologie oder dem Mapping des Meeresbodens (Johnsen2016, Liu2020).

Die Entscheidung, umfangreiche Messreihen mit dem Trübungsmittel Maalox zur Laborsimulation natürlicher Gewässer durchzuführen basiert 1) auf dessen Eignungsnachweisen von Duntley (Duntley1971), Petzold (Petzold1972) und Laux (Laux2002), sowie 2) darauf, dass Maalox weiterhin regelmäßig für wissenschaftliche Studien und Instrumentenentwicklungen herangezogen wird wie z.B. in der Entwicklung von Einzelphotonen-LiDAR Systemen (Maccarone2015) und Untersuchungen zu neuen Methoden der optischen Unterwasserkommunikation (Oubei2018).

Im DLR-Institut wurde bereits im Zuge der Entwicklung eines Unterwasser Gated-Viewing Systems für die Sichtverbesserung bei Inspektionsaufgaben in trüben Gewässern eine Erstuntersuchung zur PSF bei 550 nm durchgeführt, da solche Systeme auf Grund der erhöhten Sichtweite besonders den Vorwärtsstreuungseffekten ausgesetzt sind. An dieser Stelle wurde für weitere PSF-Messungen angeknüpft.

### **Polarisation:**

Die Arbeit zur Nutzung der Polarisation zur Ableitung von Oberflächenneigungen wurde mit einer Literaturrecherche gestartet.

Die Polarisations-eigenschaften von Licht werden in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt. Beispiele sind Instrumente und Methoden zur Sichtverbesserung im Automotive-Sektor sowie im Sicherheitsbereich (Laan2023, Peters2023), Visualisierung von Spannungen in Materialien in Industrieprozessen (Nowak2015), oder die Formanalyse von dielektrischen Oberflächen (shape analysis) im Bereich der Computer Vision (Atkinson2006, Atkinson 2018). Im letztgenannten Bereich basiert die sogenannte „shape-from-polarization“-Methode typischerweise auf diffuser Rückstreuung, die sich aus der Überlagerung mehrfacher Reflexionen an Atomschichten in bzw. unter der Oberfläche ergibt („sub-surface scattering“), gemäß dem Wolff-Modell (Wolff1992, Wolff1994). Der Polarisationszustand des einfallenden Lichts wird dadurch zerstört, so dass der gemessene Polarisationszustand allein von der Brechung des reflektierten Lichts beim Wiederaustritt aus dem jeweiligen Material verursacht wird. Dies ist allerdings ein optimaler Fall, und im Gegensatz dazu ist der gemessene Polarisationszustand über einer Wasseroberfläche wie im REMAP-Projekt eine Überlagerung aus

1. dem Polarisationszustand des einfallenden Himmelslichts
2. der Polarisierung durch spiegelnde Reflexion an der Wasseroberfläche
3. Unterwasser-Effekten inklusive der Polarisierung durch Brechung beim Wiederaustritt von aus dem Wasserkörper aufsteigenden Licht (durch Streuung innerhalb des Wassers oder Reflexion am Meeresgrund)

Die Herausforderung der in 2.1 dargestellten Methode ist es, eine „shape-from-polarisation“-Methode zu entwickeln, die nur den Effekt (2) nutzt, um die Oberflächenneigung zu berechnen. Der Effekt (3) soll durch spektrale Filterung hinreichend minimiert werden (siehe Kapitel 2.1), während (1) zunächst durch die Beschränkung bei bewölktem Himmel (= unpolarisiertes Himmelslicht) umgangen werden kann.

Die zugrunde liegende Theorie der Berechnung von Oberflächensteigungen bzw. -normalen aus Polarisationsmessungen mithilfe von Fresnel-Koeffizienten ist bekannt (Kattawar1989, Wolff1991) und wurde bereits in anderen Studien erfolgreich demonstriert. Beispielsweise nutzte Zappa et al. (2008) ein Polarisations-sensitives 3-Kanal-System. Wie in REMAP auch, war diese Studie zunächst auf bewölkten Himmel, d.h. unpolarisiert einfallendes Licht beschränkt. Mithilfe von Müller-Matrizen wurden Gleichungen für den linearen Polarisationsgrad (Degree of linear polarization, DoLP) aufgestellt, der sich wie oben beschrieben als Überlagerung von spiegelnder Reflexion und aus dem Wasser aufsteigenden und an der Oberfläche gebrochenen Lichts ergibt. Allerdings wurde dieser letztere Anteil dann durch die Annahme berücksichtigt, dass in einem temporären Mittel die Neigung der Oberfläche Null sein müsste. Dies ist in REMAP natürlich nicht möglich, da sich die Drohne bewegt.

Ein anderes Instrumentendesign nutzte Pezzaniti et al. (2009), das aus partiell polarisierenden Strahlteilern bestand und alle 4 Elemente des Stokes-Vektors gleichzeitig aufnahm, d.h. inklusive zirkularer Polarisation, die in REMAP nicht gemessen wurde. In Einklang mit der Mehrheit aller anderen Studien wurde allerdings eine zu vernachlässigende zirkulare Polarisation für diese Anwendung gefunden. Die Autoren betonen die Notwendigkeit schneller Messungen (und daher kleiner Blendenzahlen), um Bewegungsunschärfe zu vermeiden. Wiederum wurde unpolarisiert einfallendes Licht angenommen. Im selben Jahr berichteten Baxter et al. (2009) von Flugzeug-Messungen mit einem 12-Kanal-System (3 Polarisationsrichtungen und 4 spektrale Bänder), das intensiv kalibriert wurde (Hooper2015). Das Ziel waren 2D-Karten der Oberflächensteigung (bzw. Reliefs), um die Wellenhöhe abzuleiten. Aufgrund der Flughöhe von 3200 m wurden polarisierende Effekte in der Atmosphäre berücksichtigt, die in REMAP vernachlässigt werden, da davon auszugehen ist, dass die REMAP-Drohne weit niedriger fliegt. Die Polarisation des einfallenden Lichts wurde durch ein Rayleigh-Modell

approximiert. Der Einfluss von aus dem Wasser aufsteigender Strahlung wurde nicht berücksichtigt, die Autoren betonen aber, dass ein besseres Verständnis des Zusammenspiels der einzelnen Einflüsse bzw. Komponenten notwendig ist.

Im Jahre 2012 berichtete Barsic et al. (2012) von boden-gebundenen Polarisationsmessungen und adressierten insbesondere das Problem der Mehrdeutigkeit des DoLP als Funktion des Oberflächenwinkels  $\theta$  (Winkel zwischen Oberflächennormaler und eintreffendem bzw. reflektiertem Strahl), da das DoLP ein Maximum beim Brewsterwinkel aufweist und sich folglich  $\theta$  nicht eindeutig bestimmen lässt. Es wurde ein inverser Optimierungsalgorithmus vorgeschlagen, der sich an sogenannten „shape-from-shading“-Methoden orientiert, um diese Mehrdeutigkeit aufzulösen. Die Polarisation des Himmelslichts wurde durch Fitten der Messergebnisse an ein Rayleigh-Modell berücksichtigt. Im Ergebnis wurde gefunden, dass sich die Oberflächenneigung des Wassers in „cross-look“ (also in der Bildebene) sehr gut reproduzieren lässt, während „in-look“ (aus der Bildebene heraus) größere Fehler auftreten. Als Grund wird angeführt, dass die Messung der linearen Polarisationsrichtung (Angle of linear polarization, AoLP) robuster ist als das DoLP hinsichtlich des Beitrags der aus dem Wasser aufsteigenden Strahlung, und die Neigung „cross-look“ vornehmlich vom AoLP abhängt, während die Neigung „in-look“ vornehmlich vom DoLP abhängt. Eine testweise und unvollständige Berücksichtigung eines zusätzlichen (als unpolarisiert angenommenen) Beitrags aus dem Wasser führte zu deutlichen Verbesserungen und die Autoren mutmaßen, dass eine vollständige Berücksichtigung den Fehler weiter reduzieren würde und ggf. sogar erlauben könnte, optische Eigenschaften des Wassers aus den Messungen zu berechnen. Dies ist im Einklang mit jüngeren Studien (z.B. Gilerson2020), die Polarisationsmessungen auf dem Ozean für Umweltwissenschaften einsetzen.

Im Jahre 2018 beschäftigte sich ebenfalls Lu et al. (2018) mit der Mehrdeutigkeit des DoLP als Funktion von  $\theta$  und Möglichkeiten, die Mehrdeutigkeit aufzulösen. Im selben Jahr schlug Liu et al. (2018) eine Methode vor, um die paraxiale Approximation zu korrigieren, was eine weit verbreitete Näherung ist. Dabei wird der Öffnungswinkel des Objektivs vernachlässigt und Strahlen als parallel zur optischen Achse (Bildmitte) angenommen. Die Näherung ist valide, wenn der Bildwinkel klein ist. In REMAP werden jedoch Bildwinkel bis zu einigen Grad benutzt. Mit paraxialer Näherung sind dementsprechend auch die Fehler der errechneten Oberflächennormalen bis zu einigen Grad groß und nehmen von der Bildmitte (kein Fehler) zu den Bildrändern und -ecken kontinuierlich zu.

Schließlich werden in Review-Artikeln (Li2023) die fundamentale Prinzipien und Herausforderungen von shape-from-polarization-Techniken zusammengefasst.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Hinsichtlich der Entwicklungsarbeiten für die Sensorentwicklung im gemeinsamen Verbundprojekt wurde mit keinen externen Partnern außerhalb des Verbundprojekts zusammengearbeitet.

Für die beiden wissenschaftlichen Paper (siehe 2.6) wurde mit Partnern von Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammengearbeitet, die im jeweiligen Feld aktiv sind. Die Zusammenarbeit betraf wissenschaftlichen Austausch und Diskussionen über durchgeführte Grundlagenexperimente, Mitarbeit bei der Erstellung der Paper und Ko-Autorenschaft.



## 2. Eingehende Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden thematisch gegliedert nach Schwerpunkten aufgeschlüsselt dargestellt und den vorgegebenen Zielen gegenübergestellt.

#### 2.1.1 Point Spread Function (PSF)

Jedes optisch abbildende System erfährt durch verschiedenste Effekte eine Reduktion der räumlichen Auflösung. Neben systembedingten Auflösungs-Limitationen durch Sensor und Objektiv, hat das Medium im optischen Pfad mehr oder weniger starken Einfluss auf das Abbildungsvermögen.

Die Point-Spread-Function (PSF) beschreibt die Abbildung eines räumlichen Delta-Pulses, also einer Punktquelle, mit einer Cosinus-Abstrahlcharakteristik (Ahrenberg 1981). Sie bildet alle Mehrfach-Streuprozesse entlang des optischen Pfads ab. Während die PSF in der Atmosphäre nur auf sehr großen Pfadlängen oder z.B. in stark nebligen Szenarien eine signifikante Rolle spielt, ist ihr Effekt im Unterwasser-Bereich vor allem in Küstengewässern und Gebieten hoher biologischer Produktion relevant. Neben der Rayleigh-Streuung an molekularem Wasser selbst, tragen vor allem Luftblasen, Phytoplankton und nicht-Algen Partikel (NAP) wie z.B. Mineralien und Detritus zu dem typischen, stark vorwärts gerichteten Streuverhalten bei (Watson2013). Für die Entwicklung der im Projekt angestrebten Kamera-Sensorik zur Bestimmung der lokalen Wassertiefe stellt sich die Frage, ob und in welchen Umgebungsbedingungen Streuprozesse einen entscheidenden Einfluss auf die Messwerte nehmen. Die Arbeiten zur Beantwortung dieser Fragestellung gliederten sich hierzu in folgende drei Hauptsegmente (schematisch dargestellt in Abbildung 1):

1. Zur Abschätzung des PSF-Einflusses im Zuge dieser Arbeit wurden a) Die Sensorparameter, b) die vorliegende Messgeometrie, c) Gewässereigenschaften in Form von Transmissionspektren und d) die multispektralen PSF-Labormessungen herangezogen.
2. Aus den Sensorparametern und der Messgeometrie wurden die Intensitäts- und Winkel-Grenzwerte abgeleitet, bei deren Überschreitung der PSF-Einfluss spürbar wird. Durch einen Abgleich der Gewässereigenschaften im Zielgebiet mit den Transmissionspektren der im Labor simulierten Gewässer-Bedingungen werden die PSF-Messungen den Realgewässern zugeordnet.
3. Basierend auf den Schwellwerten und den PSF-Messungen wurde der Einflussbereich und der Einflussfaktor der PSF auf die Messungen im Feld abgeschätzt.

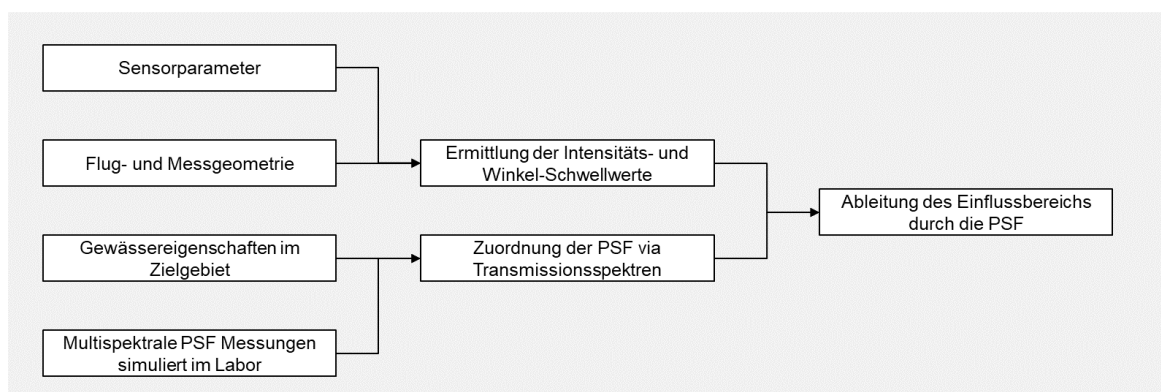


Abbildung 1: Workflow zur Bestimmung des PSF Einflusses auf reale Flugszenarien.

## Sensorparameter und Messgeometrie

Bei der im REMAP-Verbundprojekt verwendeten multispektralen Kamera handelt es sich um das Modell TOUCAN der Firma SiliOS. Der 2048 x 2048 Pixel große Sensor ist mit einer 4 x 4 Filtermatrix zum Erhalten der 10 spektralen Kanäle im Bereich von 420 bis 870 nm belegt. Dementsprechend reduziert sich die tatsächliche, nicht interpolierte vertikale und horizontale Auflösung der Kamera um den Faktor 4 auf 512 x 512 Pixel. Folglich liegt der wahre Pixelabstand (Pixel pitch) zwischen 2 Pixeln gleicher Spektralinformation bei 22 µm anstatt bei 5.5 µm. Das minimale vom Sensor, durch die Diskretisierung der Pixel, abbildbare räumliche Winkelement  $a_{pix}$  ergibt sich aus dem Abstand zweier Pixel und der Brennweite  $f$  der genutzten Optik nach

$$a_{pix} = 2 \arctan\left(\frac{4 \cdot \text{Pixelabstand}}{2f}\right)$$

Für die SiliOS TOUCAN-Kamera in Kombination mit der verwendeten  $f=50$  mm Optik, ergibt sich eine minimale Auflösung von  $a_{pix} = 1.75$  mrad ( $0.1^\circ$ ).

Die Bittiefe der Kamera bestimmt den kleinsten abbildbaren Intensitätssprung pro Pixel. Mit einer Bittiefe von 10-bit löst die Kamera bei voller Aussteuerung in 1024 Schritten auf. Dennoch ist zu bedenken, dass die Bilddynamik weiter reduziert wird 1) durch nicht vollständige Aussteuerung und 2) durch den Dunkel-Offset (Schwarzwert).

Zusätzlich nimmt die Flug- und Messgeometrie der Multispektralkamera und -Optik maßgeblichen Einfluss auf den Schwellwert für die Beeinflussung des Systems durch die PSF. Die PSF beschreibt die Mehrfachstreuung einer Cosinus-Quelle (in diesem Fall des von einem Punkt am Bodengrund reflektierten Sonnenlichts) in Abhängigkeit des Winkels zur Oberflächennormalen  $a_{PSF}$ . Wird die Intensitätsdifferenz  $\Delta I$  über den Schwellenwinkel  $a_{Th}$ , der aus der Pixelbreite an der Wasseroberfläche und der Wassertiefe  $d$  resultiert, innerhalb der Dynamik bzw. Bittiefe der Kamera detektierbar, so nimmt die PSF Einfluss auf die Messergebnisse.

Eine Worst-Case Betrachtung erlaubt eine Vereinfachung der Geometrie: Ist der Sensor entsprechend Abbildung 2 nach Nadir ausgerichtet und werden eine plane Wasseroberfläche sowie Bodengrund angenommen, bildet der mittlere Pixel den kleinsten Abbildungsquerschnitt und somit das kritische Element. Zudem wird die PSF der Atmosphäre auf Grund des kurzen optischen Pfads von typischerweise 50-100 m und der Messung unter guten Sichtbedingungen ohne z.B. Nebel als vernachlässigbar angenommen.

Aus der Flughöhe  $h$  und dem Abbildungswinkel eines Pixels  $a_{pix}$  ergibt sich über die Geometrie die Breite des Blickfelds (FOV) eines Pixels  $w_{pix}$  an der Wasseroberfläche:

$$w_{pix} = 2h \cdot \tan\left(\frac{a_{pix}}{2}\right)$$

Der zur Bewertung des PSF-Einflusses relevante Schwellenwinkel  $a_{Th}$  folgt aus den geometrischen Beziehungen zwischen Pixelbreite auf der Wasseroberfläche  $w_{pix}$  und Gewässertiefe  $d$ :

$$a_{Th} = 2 \arctan\left(\frac{w_{pix}}{2d}\right)$$

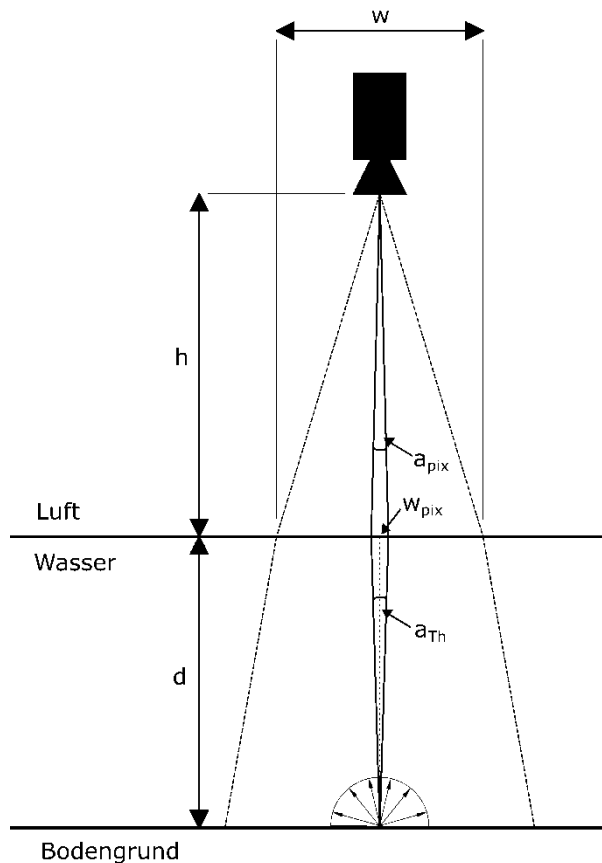


Abbildung 2: Vereinfachte Worst-Case Messgeometrie zur Einflussbestimmung der PSF.

Für ein typisches, angestrebtes Messszenario unter Verwendung der 10-Kanal Multispektralkamera SILIOS TOUCAN ergibt sich das folgende, in Tabelle 1 dargestellte geometrische Szenario (aufgeteilt in Spektralkanal-spezifische Variante mit 512 x 512 Pixeln und eine interpolierte Variante mit 2048 x 2048 Pixeln pro Kanal)

Tabelle 1: Systemparameter eines typischen Messszenarios mit der Silios TOUCAN Kamera.

Systemparameter	Wert	Einheit
Pixelabstand	22e-6	M
Anzahl Pixel (BxH)	512 x 512	Pixel
Brennweite	50e-3	m
Pixelwinkel $a_{pix}$	0.1	°
Flughöhe	50	m
Breite Pixel FOV auf Wasseroberfläche	87e-3	m
Gewässertiefe	1	m
Grenzwinkel $a_{Th}$	5	°

### Ermittlung der kritischen Schwellenwerte für den PSF-Einfluss

Grundsätzlich nimmt die PSF exakt dann relevanten Einfluss auf die Bildqualität, wenn die Intensität der Vorwärtsstreuung in den Akzeptanzwinkel eines direkt benachbarten Pixels so groß wird, dass die Bilddynamik des Sensors ausreichend zur Darstellung dieser Intensität ist. In der tatsächlichen

Abbildung ist dieser Einfluss natürlich abhängig vom inhärenten (unbeeinflussten) Kontrast der beiden Objekte, die mit benachbarten Pixeln betrachtet werden. Das heißt, werden zwei gleich helle Objekte betrachtet (z.B. eine homogen weiße Wand) geht der inhärente Kontrast gegen Null und der Einfluss der PSF wird ebenfalls gegen Null gehen. Das andere Extrem ist entsprechend der Abbildung eines schwarz-weißen Übergangs von Pixel A zu Pixel B. Hier nimmt die PSF des weißen Objekts entsprechend den maximalen Einfluss auf die Abbildung des benachbarten schwarzen Elements. In der Folge wird immer (sofern nicht explizit anders dargestellt) von einem idealen schwarz-weißen Kontrast von 100% ausgegangen.

Aus dieser Betrachtungsweise lassen sich zwei Schwellenwerte ableiten, mit deren Überschreitung die PSF grundsätzlich Einfluss auf mindestens den direkt benachbarten Pixel nimmt:

1. Der Winkel zwischen zwei benachbarten Pixeln  $\alpha_{Th}$ , welcher sich wie zuvor beschrieben aus der Messgeometrie ergibt.
2. Die Dynamik des Kamerasystems bzw. des Bildes. Idealerweise ist die Bilddynamik gleich der Bit-Tiefe der Kamera. Die tatsächlich genutzte Bilddynamik in Grauwerten (DN) ist jedoch in der Regel auf Grund von nicht-idealisierter Belichtungszeit (nicht vollständiger Bildaussteuerung) sowie Dunkeloffset reduziert.

$$\text{Bilddynamik} = \text{BitTiefe} \cdot \text{Aussteuerung} - \text{Dunkeloffset}$$

Für eine 10-Bit Kamera bei 100% Aussteuerung und einem Dunkeloffset von 100 DN ergibt sich beispielhaft eine maximal erzielbare Bilddynamik von  $2^{10} \text{ DN} \cdot 100\% - 25 \text{ DN} = 924 \text{ DN}$ . Die Dynamik wird durch das Bildrauschen zusätzlich reduziert, das in folgender Abschätzung jedoch vernachlässigt wird.

### Transmissionsspektren in Realgewässern und in den PSF-Messungen

Die Zuordnung einer geeigneten PSF aus Labormessungen zu einem Realgewässer, in dem die Bathymetrie multispektral bestimmt wurde, basiert auf dem Abgleich des Transmissionsspektrums, bzw. des wellenlängenabhängigen Beam Attenuation Coefficients (BAC) der Realgewässer, mit den Transmissionsspektren der im Labor unter Einsatz eines künstlichen Trübungsmittels generierten Gewässer. Die Transmissionsmessungen wurden mit einem TriOS Viper Sensor (genauer beschrieben in Abschnitt 2.1.3) durchgeführt.

Im Zuge der PSF-Untersuchungen wurden die in Tabelle 2 gelisteten Transmissionsspektren entweder als eigene Messung erhoben oder aus Datenbanken herangezogen (siehe Kennzeichnung). Insgesamt wurden 15 verschiedene Transmissionsmessungen selbst erhoben, wovon 10 aus den PSF-Laboruntersuchungen resultieren, 2 aus den Feldexperimenten in Kiel und Neuenwalde und 3 weitere aus Gewässern der Region.

Tabelle 2: Übersicht der Transmissionsspektren für die PSF Einfluss-Untersuchungen

ID	Ort	Quelle	Hinweis
1	Kiel Friedrichsort	Eigene Messung	Messung im Zuge der Feldexperimente (siehe 2.1.3)
2	Baggersee Neuenwalde	Eigene Messung	Messung im Zuge der Turmmessungen (siehe 2.1.3)

3	Süßwassersee, Niedersachsen	Eigene Messung	Zusätzliche Transmissionsspektren für Inlandsgewässer
4	Helgoland	Datenbank HE516 [xyzWollschläger-Pangaea]	Typisches Gewässer für die deutsche Bucht
5	Nordsee	Datenbank HE516 [xyzWollschläger-Pangaea]	Typisches Gewässer für die deutsche Bucht
6	Atlantik	Datenbank HE516 [xyzWollschläger-Pangaea]	Repräsentiert ein ozeanisches Gewässer
7	Hafenbecken, Bremerhaven	Eigene Messung	Zu trübe für multispektrale Bathymetrie
8	Wesermündung, Bremerhaven	Eigene Messung	Zu trübe für multispektrale Bathymetrie
9	PSF Labormessungen	Eigene Messung	Simulation natürlicher Gewässer durch Zugabe eines Trübungsmittels zu deionisiertem Wasser

Abbildung 3 zeigt typische BACs gemessen in der Nordsee und dem Atlantik (die Daten stammen von der Heincke-Ausfahrt HE516). Auch wenn die Messdaten weniger küstennah sind, zeigen Sie dennoch den für die PSF-Messungen relevanten Wertebereich der Transmissionsspektren auf. Hieraus lässt sich ableiten, dass für die PSF-Messungen Gewässer simuliert werden müssen, welche von sehr klar (ozeanisch) wie z.B. im Atlantik oder auch relevant im Mittelmeer-Raum, bis hin zu Extinktionskoeffizienten von etwa 4/m (Abbildung 3 D, vor Helgoland) reichen.

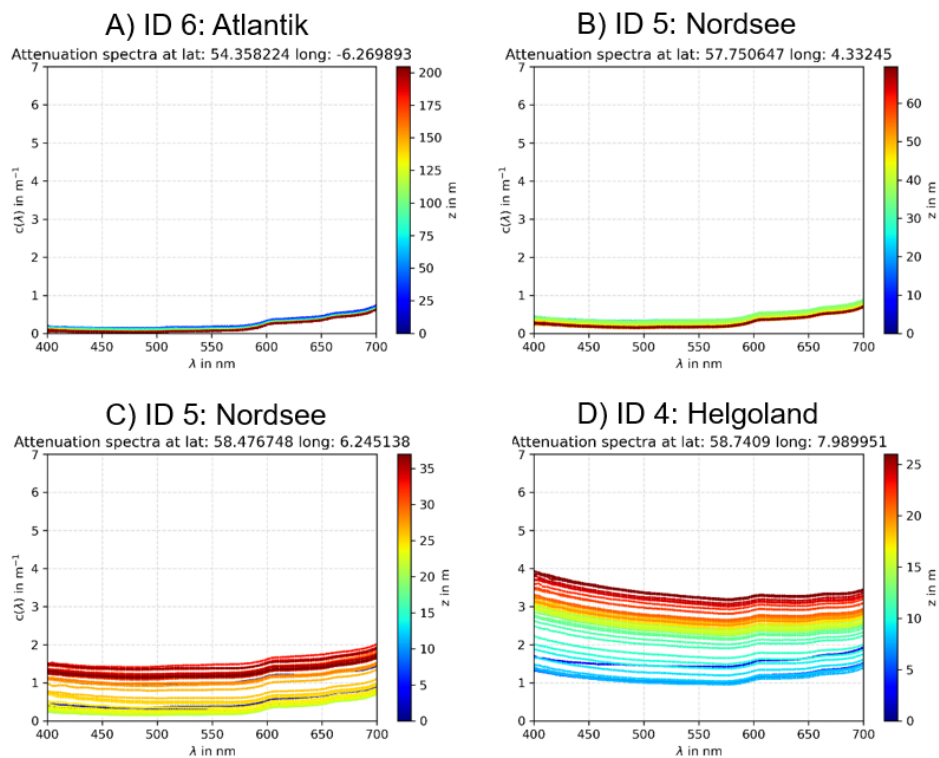


Abbildung 3: Transmissionsspektren der Nordsee und des Atlantiks.

Die im Labor für die PSF-Messungen nachgebildeten Gewässer basieren auf der Zugabe der Aluminiumhydroxid- und Magnesiumhydroxid-Suspension „Maalox“ zu deionisiertem Wasser. Maalox wurde bereits zuvor als hervorragend zur Simulation natürlicher mariner Gewässer geeignetes Trübungs- und Streumittel nachgewiesen (z.B. Duntley et al., Petzold et al., siehe Kapitel 1.4) und wird regelmäßig in der Entwicklung mariner optischer Systeme genutzt. Dies liegt vorrangig an der Partikelgrößenverteilung, welche der Verteilung in natürlichen Gewässern sehr ähnlich ist. Im Zuge der Untersuchungen wurden die Partikelgrößenverteilungen von Maalox, Wasser aus der Wesermündung und Wasser aus dem Fischereihafen Bremerhaven (in Abbildung 4 als Volumen-Partikelgrößenverteilung dargestellt) mit einem Horiba LA-950 Laser-Partikelanalysator vermessen. Während der Hafen und die Wesermündung sehr trübe Gewässer mit stark sedimenthaltigen Partikelgrößenverteilungen darstellen und auf Grund der starken Dämpfung des Lichts eher weniger für optische Tiefenbestimmungen geeignet sind, weist Maalox einen entsprechend hohen Anteil kleinerer Partikel auf, wie sie in klarerem Wasser typischerweise vorkommen.

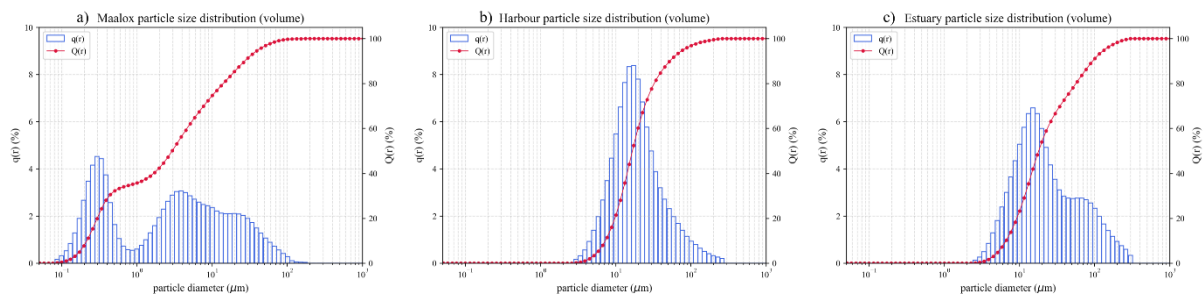


Abbildung 4: a) Maalox, b) Hafenwasser, c) Wesermündungswasser Volumen-Partikelgrößenverteilungen (dargestellt in blau) und deren kumulierte Verteilungen (rote Linien), gemessen mit einem Horiba LA-950.

Die PSFs wurden in Maalox-Konzentrationen von 0 mL/230L (Deionisiertem Wasser) bis 25 mL/230L gemessen. Dies entspricht bei einer Wellenlänge von 450 nm Beam Attenuation Coefficients (BACs) von 0.009/m bis hin zu fast 9/m. Dementsprechend wurden durch die Zugabe von Maalox für die PSF-Messungen BACs simuliert, welche alle relevanten in Tabelle 2 gelisteten Gewässer (das Hafenwasser und Weserwasser, ID 7 und ID 8 sind zu trübe) abdecken.

Im Speziellen und hier exemplarisch dargelegt, lassen sich die Gegebenheiten während der Feldexperimente in Kiel Friedrichsort vergleichen mit dem mittleren Spektrum zwischen Maalox-Konzentrationen von 2mL/230L und 3mL/230L, welche in Abbildung 5 dargestellt sind und in den PSF-Experimenten angemischt wurden. Dementsprechend wurde angenommen, dass sich der PSF-Einfluss im Bereich zwischen den beiden PSFs, aufgenommen bei diesen beiden Maalox Konzentrationen, abschätzen lässt. Hervorzuheben ist, dass dies jedoch nur bedingt für den Bereich um 480 nm gilt, welcher in Kiel den typischen Peak für die Chlorophyll-Absorption durch Phytoplankton und Algen zeigt. Da eine breite PSF auf Streuung und nicht auf Absorption von Photonen basiert (eine hohe Absorption führt zu weniger breiten PSFs, da die gestreuten Photonen auf Grund des längeren Lichtwegs eine höhere Absorptionswahrscheinlichkeit als direkte, nicht gestreute Photonen haben) ist zu erwarten, dass die PSF in Kiel bei etwa 480 nm tendenziell enger/steiler ist als in der Laborsimulation. Ebenfalls anzumerken ist, dass es einen eher oberflächennahen Layer Chlorophyll-absorbierenden Materials gab, da nur die Spektren, welche unmittelbar unterhalb der Wasseroberfläche aufgenommen wurden, diese Peaks aufweisen (siehe Kapitel 2.1.3). Die übrigen Spektren ohne die charakteristischen Peaks wurden in zunehmender Tiefe gemessen.

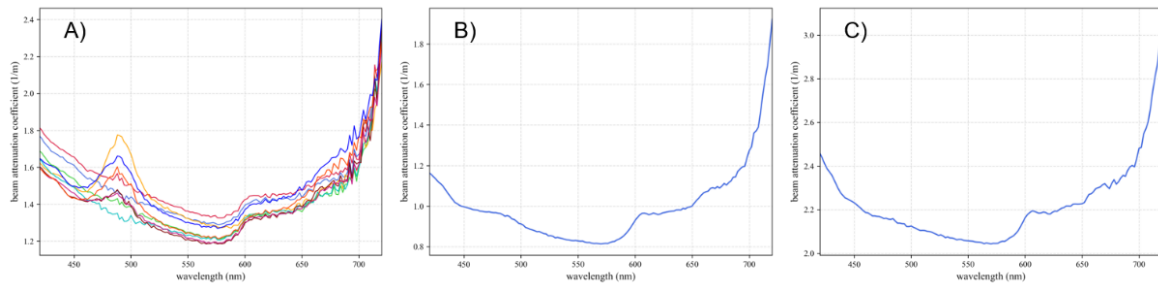


Abbildung 5: Die Beam Attenuation Coefficient Spektren der Befliegung in Kiel Friedrichsort A) sind vergleichbar mit dem mittleren Spektrum der mit Maalox simulierten Gewässer mit Konzentrationen von B) 2mL/230L und C) 3mL/230mL.

### PSF Labor-Teststand und Messreihen

Da das DLR Institut für den Schutz maritimer Infrastrukturen (DLR-MI) bereits über einen monospektralen PSF-Teststand im Labor verfügte, wurde dieser für den multispektralen Betrieb umgerüstet und zur Bestimmung der PSFs genutzt.

Insgesamt wurden im Zuge des Projekts PSFs in 10 verschiedenen Gewässervarianten (deionisiertes Wasser und unter Zugabe von 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 und 25 mL Maalox) gemessen. Zu jedem Gewässertyp wurden Messungen bei den zentralen Wellenlängen von 450, 500, 550, 600 und 650 nm in jeweils 5 verschiedenen optischen Pfadlängen (600, 700, 800, 900, 1000 mm) durchgeführt. Dies resultierte in insgesamt 250 verschiedene PSF Messkurven, was bereits einen umfangreichen und in seiner multispektralen Charakteristik einzigartigen PSF Datensatz darstellt. Hinzu kommen noch weitere PSF-Messungen in Weserwasser, Hafen- und Süßwassersee-Wasser.

Nach oben genannter Definition der PSF kann diese auf verschiedene Arten gemessen werden. Entscheidend ist die Variation des Winkels zwischen den optischen Achsen des Detektors und des Emitters. Vorliegende Messungen wurden mit einer Kamera durchgeführt, bei der jeder einzelne Pixel einem Photodetektor mit einer anderen Winkelausrichtung zur Quelle entspricht (siehe schematische Darstellung in Abbildung 6).

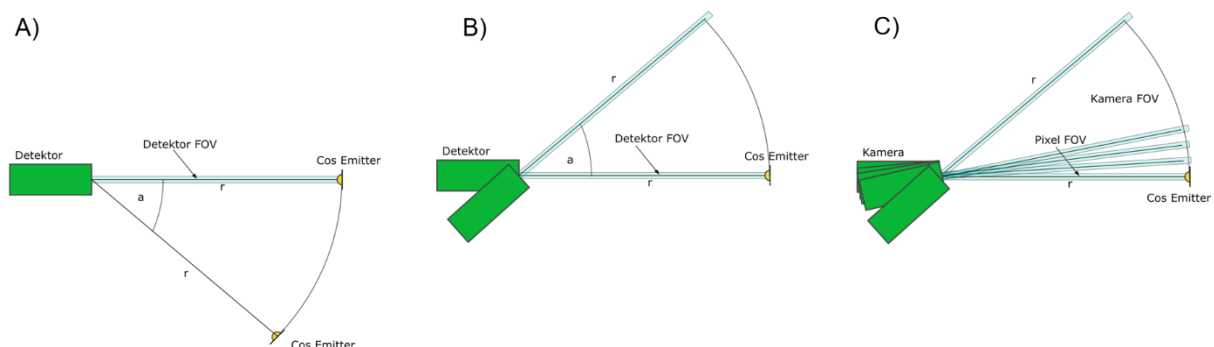


Abbildung 6: Optionen der PSF-Messung mit A) einem festen Photodetektor und einer beweglichen Lichtquelle, B) einem beweglichen Photodetektor und einer festen Lichtquelle und C) einer feststehenden Kamera und Lichtquelle.

Durchgeführt wurden die PSF-Messungen in einem 1200x500x500 mm (Länge x Breite x Höhe) großen Becken, welches befüllt mit 230 Litern Wasser optische Pfadlängen von 500 mm bis 1000 mm erlaubt. Mit schwarzen Platten abgedeckte Seitenflächen des Beckens reduzieren Fehler durch direkte



Reflexionen an den Glasscheiben. Das Becken wurde mit deionisiertem Wasser befüllt und anschließend wie oben beschrieben schrittweise mit Maalox eingetrübt. Zur Reduktion von Sedimentationsprozessen wurde eine Strömungspumpe installiert. Das Transmissionsmessgerät TriOS Viper, das zur Messung von spektralen Absorptionskurven bei den verschiedenen Trübungen diente, wurde während der PSF-Messungen aus dem Becken entfernt, um mögliche Reflexionen an der Titanhülle zu vermeiden. Abbildung 7 zeigt den Becken-Aufbau im Labor des Instituts ohne vordere schwarze Platte.

Als nahezu punktförmige Lambert-Quelle wurde ein Thorlabs CCSA1 Spectralon Diffusor (4 mm Durchmesser) vor den Ausgang einer optischen Faser mit 0.6 mm Kerndurchmesser montiert und im Becken installiert. Als Lichtquelle wurde eine stabilisierte, fasergekoppelte Xenon-Quelle (Thorlabs SLS205) verwendet. Der Vorteil einer Xenon-Lampe ist das vergleichsweise gleichförmige Emissionsspektrum zwischen 450 und 700 nm. Die Faserkopplung erlaubt die Nutzung eines In-Line Filters (Thorlabs FOFMS/M) für den Einsatz verschiedener Farbfilter. Genutzt wurden 40 nm breite (FWHM) Colored Glass Filter mit zentralen Wellenlänge von 400, 450, 500, 550, 600 und 650 nm. Mittels Montage des Faserkopfes auf einer Schiene, wurde der Abstand der Quelle zum Beckenende variiert.

Auf der gegenüberliegenden Seite des Beckens wurde eine Kamera als Detektor positioniert. Dabei handelt es sich um eine HDR-kalibrierte 1.3 MPixel Kamera (Teledyne-e2v Onyx) mit 25 mm F/4 Optik. Die HDR-Kalibrierung ist notwendig, da PSFs typischerweise Intensitätsbereiche über mehrere Größenordnungen umfassen, welche von der 12-bit Kamera in einem einzigen Bild nicht abbildbar sind. Dementsprechend wurde im Rahmen von REMAP eine Kalibriermethode entwickelt und umgesetzt, welche die Verwendung solcher non-scientific Kameras für die PSF-Messungen über mehr als 5 Größenordnungen ermöglicht. Hierzu wurden Grauwertkurven bei 11 unterschiedlichen Belichtungszeiten von aufgenommen bei gleichzeitigen Messungen der einfallenden Bestrahlungsstärken über einen Referenzdetektor (Photodetektor), welcher den vollen Dynamikbereich von mehr als 5 Größenordnungen umfasst. Über diese Kalibrierung lassen sich die Grauwerte der Bilder bei unterschiedlichen Belichtungszeiten in eine, für alle Belichtungszeiten gültige, Bestrahlungsstärke umrechnen. Zudem wurde parallel dazu die Linearität der Kamera besser als 1.5% für Grauwerte zwischen 50 und 3000 bei allen Belichtungszeiten bestimmt. Eine genaue Beschreibung des Kalibrierverfahrens wird in Schmidt et al. (in prep.) veröffentlicht.

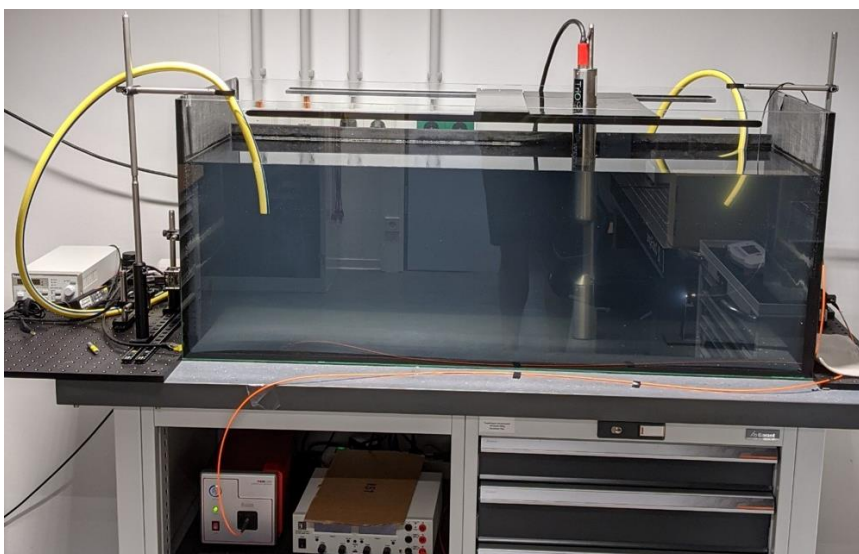


Abbildung 7: Beckenaufbau für die PSF-Messungen im Labor des DLR-Instituts.



Die Sensor-Optik-Kombination führt zu einer Winkelauflösung der gemessenen PSFs von 0.29 mrad (0.0168°) in Wasser. Der maximale Winkel ist 240 mrad (13.8°).

Der Prozess zur Bestimmung der PSF aus den Bildern der Kamera wurde ebenfalls im Rahmen des Projekts optimiert. Zuvor wurde die PSF als „Line-Spread Function“, also als Funktion der winkelabhängigen Intensität entlang einer Linie durch die Quelle wie in Abbildung 8 A) bestimmt. Dies führt zu einer mittleren PSF resultierend aus dem Intensitätsabfall in zwei Richtungen (links und rechts) wie in Abbildung 8 B) dargestellt. Die PSF lässt sich bereits mit diesem Verfahren zuverlässig bestimmen, jedoch führt die Ausnutzung der kompletten Radialsymmetrie, also aller im Bild abgebildeten Winkel, zu mehr Messdatenpunkten und zu einer besseren Genauigkeit durch die Bildung eines Mittelwerts. Insbesondere wurde hierdurch eine höhere Robustheit gegenüber besonders großer Partikel, welche nahe der Quelle als sehr helle Ausreißer auftreten, verbessert.

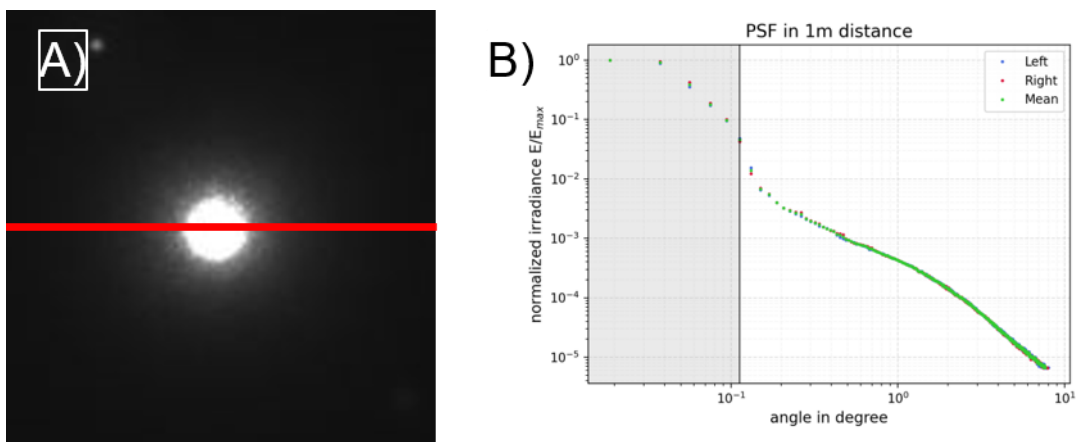


Abbildung 8: Altes PSF Bestimmungsverfahren basierend auf der Auswertung einer Linie durch die Quelle.

Schließlich führt die radialsymmetrische Auswertung dazu, dass 1) signifikant mehr Winkel-Messdatenpunkte vorliegen und 2) es zu jedem Winkel vier anstatt nur zwei Intensitätswerte gibt. Diese verbesserte Datenlagen führt zu oben beschriebener zusätzlicher Robustheit und letztlich Genauigkeit der PSF-Messung.

Abbildung 9 zeigt ein typisches PSF-Messergebnis, in diesem Fall für eine Wellenlänge von 600 nm in mäßig trübem Wasser über 1 m Distanz gemessen. Es wird deutlich, dass 1) die HDR-Kalibrierung notwendig ist, da sich die PSF über mehr als 5 Größenordnungen erstreckt und 2) dass bis etwa 100 mrad (5.7°) gemessen wurde. Hervorzuheben ist der Einfluss der nicht unendlich kleinen Ausdehnung der Quelle auf die PSF. Die eigentliche PSF beginnt erst im Bereich um 2.5 mrad, da bei kleineren Winkeln die im Durchmesser 4 mm große, verschmierte Quelle von der Kamera abgebildet wird. Die vollständige Abbildung der Quelle ist dennoch notwendig um das Zentrum der Quelle und somit die PSF-Winkel exakt zu bestimmen.

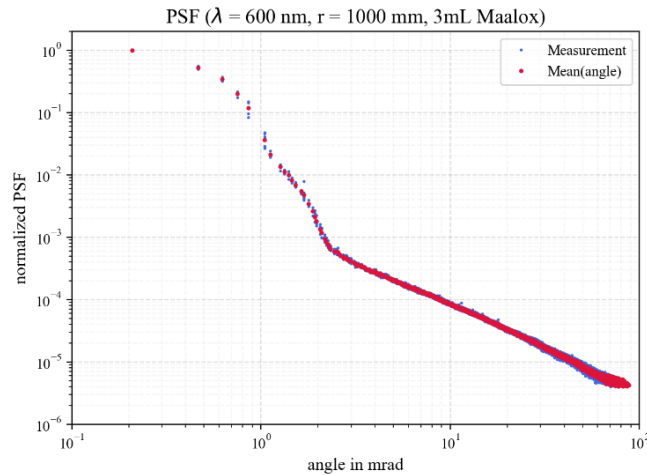


Abbildung 9: Deutlich verbesserte Datenlage durch Optimierung des PSF-Bestimmungsverfahrens unter vollständiger Ausnutzung der Radialsymmetrie.

Eine umfassende Auswertung aller Messergebnisse zeigte einen deutlichen Einfluss der Farbe auf die Steigung der PSF. Insbesondere kurzwelliges Licht wird deutlich stärker gestreut als Langwelliges. Dementsprechend ist ein größerer Einfluss der PSF auf die kurzwelligen Kanäle der Kamera zu erwarten, als auf die langwelligen. Die Messergebnisse zeigten weiterhin, dass die PSF vor allem dann relevant wird, wenn hohe Maalox-Konzentrationen, ergo hohe Trübungen oder sehr lange optische Wege, vorliegen. Abbildung 10 stellt dies exemplarisch für die Wellenlänge von 550 nm und eine optische Pfadlänge von einem Meter da. Die PSF flacht mit steigender Maalox Konzentration sichtbar ab – ihr Einfluss auf das Bild steigt.

Entsprechend wird die PSF vor allem in trübere Gewässern und in den größeren Tiefenbereichen relevant, in denen die multispektrale Tiefenbestimmung sowieso auf Grund der geringeren Lichtverfügbarkeit und schlechterem Signal-zu-Rausch-Verhältnis an Genauigkeit verliert. Die PSF verstärkt diesen Effekt also weiter. Letztlich korreliert die PSF-Steigung mit der Dämpfungslänge, welche sich aus der dem Beam Attenuation Coefficient multipliziert mit der tatsächlichen Weglänge ergibt. Eine detaillierte Analyse des Farb-Dämpfungslängen-Verhaltens der PSF wird in Schmidt et al. (in prep.) gegeben.

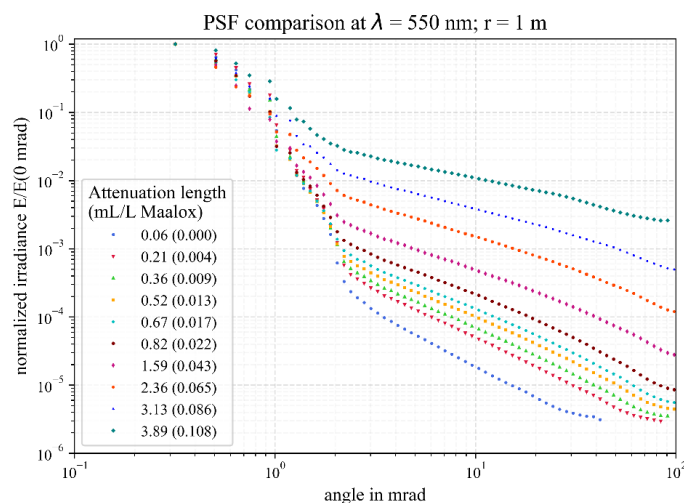


Abbildung 10: PSF-Übersicht gemessen über einen Meter Distanz bei verschiedenen Maalox-Konzentrationen.

## Ergebnisse der PSF Einfluss-Abschätzung für das REMAP-Kamerasystem

Schließlich wurde mit den gemessenen PSF Kurven, den Transmissionsspektren und den Kamera- und Flug-Geometrien der Einfluss der PSF auf das REMAP-System abgeschätzt. Durch Hinzufügen des oben definierten Schwellenwinkels  $\alpha_{Th}$  zu den PSF-Grafiken (kenntlich gemacht als pixel border in Abbildung 11) und der Eintragung des Limits der Bilddynamik (kenntlich gemacht als dyn. range limit in Abbildung 11) ergeben sich 4 Quadranten, in denen der Einfluss der PSF dargestellt wird:

1. Befindet sich die PSF im ersten Quadranten unterhalb der Bilddynamik und innerhalb des Schwellenwinkels nimmt sie keinen Einfluss auf die Abbildung.
2. Wird der Schwellenwinkel überschritten, unterhalb der Auflösung der Bilddynamik (rechter unterer Quadrant), dann nimmt die PSF Einfluss, dieser ist jedoch auf Grund der begrenzten Bilddynamik des Kamerasystems nicht abbildbar.
3. Bei Überschreitung des Bilddynamischen Auflösungsvermögens innerhalb des Schwellenwinkels (linker, oberer Quadrant) nimmt die PSF auf Grund der Diskretisierung durch die Pixel ebenfalls keinen Einfluss auf benachbarte Pixel.
4. Liegt die PSF jedoch oberhalb des Auflösungsvermögens der Kamera und ist breit genug, sodass der Schwellenwinkel zum benachbarten Pixel überschritten wird, so nimmt die PSF Einfluss auf die räumliche Auflösung und den Kontrast im Bild.

Abbildung 11 zeigt die PSF-Kurven für verschiedene Maalox Konzentrationen bzw. verschiedene Beam Attenuation Spektren. Eingezeichnet sind die Quadranten für einen Überflug in 50 m Höhe bei 1 m Wassertiefe für eine 10-Bit Kamera (A) und eine 12-Bit Kamera (B).

Aus obigem Vergleich der Transmissionsspektren in Kiel mit den Transmissionsspektren in Maalox (siehe Abbildung 5) geht hervor, dass die PSF zwischen 0.02 und 0.03 mL/L Maalox die Bedingungen in Kiel gut repräsentieren. Für das 1 m Tiefe Szenario entspricht dies dem Bereich zwischen der mittel- und dunkelblauen PSF in Abbildung 11. Folglich nimmt die PSF in diesem Szenario keinen Einfluss auf die benachbarten Pixel, da die Silios TOUCAN Kamera mit 10-Bit betrieben wurde. Die Aufnahmen einer potenziell optimierten Kamera mit 12-Bit Bilddynamik würde jedoch von der PSF im gleichen Szenario beeinflusst werden (Abbildung 11 B).

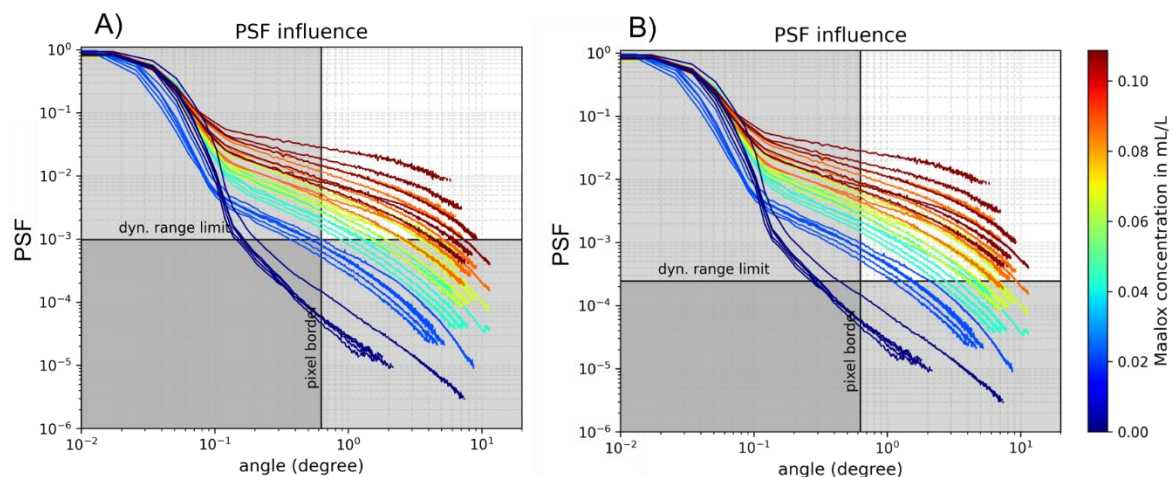


Abbildung 11: PSF-Übersicht für die in den Feldexperimenten genutzte Fluggeometrie mit 50 m Flughöhe und einer Gewässertiefe von 1 m. Die Einflussgrenzen für A) eine 10-Bit und B) eine 12-Bit Kamera sind dargestellt.

## Gegenüberstellung zu den vorgegebenen Zielen:

Wie im Projektantrag beabsichtigt und oben ausführlich beschrieben, wurde die PSF bei 10 verschiedenen Partikelkonzentrationen, 5 verschiedenen Weglängen und 5 verschiedenen Wellenlängen (450, 500, 550, 600 und 650 nm) gemessen. Dies resultierte in insgesamt 250 verschiedenen PSF-Messkurven, was bereits einen umfangreichen und in seiner multispektralen Charakteristik einzigartigen PSF Datensatz darstellt. Die Laborexperimente wurden erweitert um PSF-Messungen mit realem Wasser (Weserwasser, Hafen- und Süßwassersee-Wasser). Als Nebenprodukt wurde im Zuge dessen u.a. eine Methode zur Kamerakalibrierung für die PSF-Messung über mehr als 5 Größenordnungen entwickelt.

Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen lieferten Einsichten für eine wissenschaftliche Publikation zu diesem Thema (siehe Kapitel 2.6).

Weiterhin wurde in einer Studie der Einfluss der PSF auf Daten der multispektralen REMAP-Kamera während einer Befliegung über der Ostsee analysiert. Für diese Studie wurden gemessene Umweltparameter (siehe Kapitel 2.1.3) herangezogen. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass die PSF in diesem konkreten Fall, der ein typisches Szenario für den Einsatz des REMAP-Systems repräsentiert, die Messdaten nicht beeinträchtigt.

Die vorgegebenen Ziele im Themenfeld PSF und insbesondere das damit verknüpfte SMART-E Projektziel wurden damit erreicht.

### 2.1.2 Polarisationsuntersuchungen und -experimente

#### Zusammenfassung der Arbeiten und Ergebnisse mit Empfehlungen für den PolarSens-Betrieb in REMAP:

Es wurde in Projektphase 1 eine Literaturrecherche zum Thema „shape-from-polarisation“, also der Neigungsbestimmung aus Polarisationsmessungen, durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Kapitel 1.4 ausführlich dargestellt.

Im Anschluss wurden zunächst Grundlagenuntersuchungen mit einer PolarSens-Kamera in Labor- und Feldexperimenten gemeinsam mit dem Projektpartner OptoPrecision durchgeführt. Für detaillierte Ergebnisse dieser Messungen sei auf den entsprechenden Projektbericht verwiesen. Insgesamt wurde der Nachweis erbracht, dass der gemessene Polarisationszustand Informationen über die Ausrichtung der Wasseroberfläche enthält. Ein anschauliches Beispiel dafür ist ebenfalls in Abbildung 12 dargestellt.

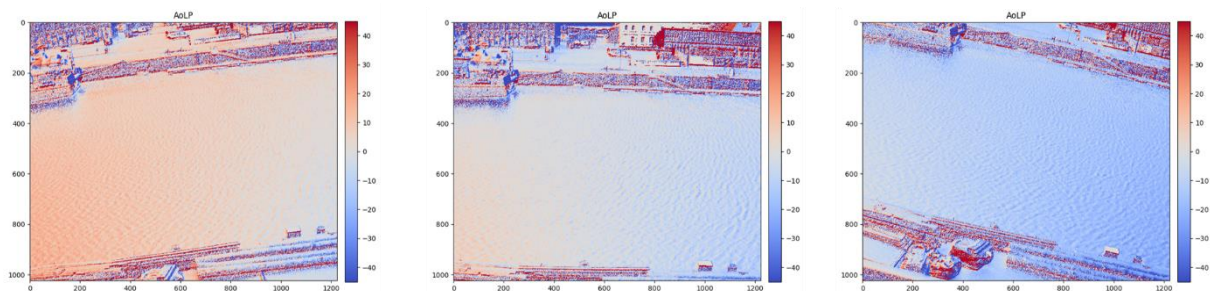


Abbildung 12: Beispielfelder der gemessenen Polarisationsrichtung (Angle of linear Polarisation, AoLP) mit der PolarSens-Kamera. Die Farbskala gibt den AoLP in Grad an. Ein AoLP von 0° entspricht einer horizontalen Polarisationsrichtung. Wird die Kamera verdreht, so verändert sich auch der AoLP über der Wasseroberfläche, d.h. er enthält Informationen über die relative Ausrichtung von der Wasseroberfläche zur Kamera.

Im Anschluss an die gemeinsamen Messungen widmete sich OptoPrecision vor allem der Installation und dem Einsatz der Kamera von der Drohne aus. Das DLR beschäftigte sich komplementär dazu mit der Frage der Trennung von Licht, das an der Wasseroberfläche (spiegelnd) reflektiert wird, und Licht, das aus dem Wasserkörper aufsteigt. Zudem wurden Optimierungen der Methode vorgenommen, speziell eine paraxiale Korrektur (siehe Kapitel 1.4) sowie eine polarimetrische Kalibration der Kamera. Abschließend wurden Genauigkeitsabschätzungen und der Einfluss verschiedener Umweltbedingungen untersucht.

Diese Arbeiten und Ergebnisse sind im Folgenden im Detail erklärt. Zusammenfassend hat sich ergeben, dass die Oberflächennormalen nach geeigneter Kamerakalibration mit einer Genauigkeit von ca.  $0.2^\circ$  in der Bildmitte und  $<1^\circ$  an den Bildrändern und -ecken bestimmt werden können. Die Voraussetzung hierfür ist allerdings eine geeignete Kamera-Kalibration, optimale Wetterbedingungen (helle Himmelsreflektion, Bewölkung), wenig Partikel im Wasser (geringe oberflächennahe Rückstreuung) sowie der Einsatz eines spektralen Langpassfilters (mindestens 850 nm). Da insbesondere der Langpassfilter in einer geringen Lichtausbeute resultiert, waren für Messungen mit der oben genannten Genauigkeit sehr lange Belichtungszeiten von ca. 2 Sekunden und das Mitteln über jeweils 10 Bilder zur Rauschreduktion notwendig. Als Konsequenz daraus wurden diese Messungen unter Laborbedingungen bei ruhiger Wasseroberfläche und statischer Kameraposition durchgeführt und funktionieren (zumindest mit der in REMAP eingesetzten Technologie) nicht mit der benötigten Genauigkeit von einer bewegten Plattform aus und unruhiger Oberfläche. Aus diesem Grund wurde empfohlen, die PolarSens aktuell nicht in den operationellen Betrieb auf der Drohne zu integrieren. Allerdings gibt es technologische Weiterentwicklungen, die einen operationellen Betrieb wie vorgesehen in der Zukunft ermöglichen könnten (siehe Kapitel 2.5).

### Messprinzip und verwendete Technologie:

Bei der in REMAP eingesetzten PolarSens-Kamera handelt es sich um das Modell DZK 33UX250 der Firma The Imaging Source. Ein Software Development Kit (SDK) kann von der Herstellerseite kostenlos bezogen werden und wurde benutzt, um eine Kamera-Steuerungssoftware in C++ zu schreiben. Die  $2448 \times 2048$  einzelnen Pixel der Kamera sitzen hinter einem Array von Polarisationsfolien, die in jeweils  $2 \times 2$  Pixeln einen sogenannten Superpixel bilden, der gleichzeitig die Polarisation in  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $135^\circ$  misst. Auf diese Weise ergibt sich eine effektive Auflösung für den Polarisationszustand von  $1224 \times 1014$ .

Aus den 4 einzelnen Intensitäten  $I_0$ ,  $I_{45}$ ,  $I_{90}$  und  $I_{135}$  eines Superpixels werden zunächst die Elemente  $S_0$ ,  $S_1$  und  $S_2$  des Stokes Vektors  $\mathbf{S}$  berechnet:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (I_0 + I_{45} + I_{90} + I_{135})/2 \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_L - I_R \end{pmatrix}$$

Die Komponente  $S_3$  beschreibt zirkular polarisierte Strahlung, die in REMAP nicht gemessen wurde, für die Anwendung aber auch keine Rolle spielt (siehe Kapitel 1.4). Es wurde  $S_3 = 0$  gesetzt.

Mit den Elementen des Stokes-Vektors wird der lineare Polarisationsgrad (Degree of linear Polarization, DoLP) sowie die Polarisationsrichtung (Angle of linear Polarization, AoLP, beispielhaft in Abbildung 12 dargestellt) berechnet:

$$DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}$$

$$AoLP = \frac{1}{2} \arctan_2 \left( \frac{S_2}{S_1} \right)$$

Hierbei bezeichnet  $\arctan_2$  die 4-Quadranten Arkustangens-Funktion<sup>1</sup>.

### Grundlagen, Fresnel-Koeffizienten und spektrale Filterung zur Trennung der Anteile:

Trifft Licht auf die Wasseroberfläche, berechnen sich die reflektierten und transmittierten Anteile gemäß den Fresnel'schen Formeln. Abbildung 13 zeigt die Reflektions- und Transmissionskoeffizienten als Funktion des Winkels  $\theta$  zwischen der Sichtlinie und der Oberflächennormalen. Die durchgezogenen Linien beschreiben die Reflexionskoeffizienten für den Übergang von Luft in Wasser für senkrecht zur Einfallsebene polarisierte Strahlung ( $R_s$ ) und parallel zur Einfallsebene polarisierte Strahlung ( $R_p$ ). Die senkrechte Komponente ist für alle Winkel größer als die parallele Komponente, d.h. einfallende (unpolarisierte) Himmelstrahlung, die an der Wasseroberfläche reflektiert wird, erfährt eine Polarisierung senkrecht zur Einfallsebene. Beim Brewsterwinkel ( $\theta = 53^\circ$  für Luft-Wasser) ist  $R_p = 0$  und somit das reflektierte Licht vollständig senkrecht polarisiert. Der aus den Reflexionskoeffizienten berechnete DoLP (magentafarbene Linie) steigt von  $\theta = 0^\circ$ , was bei glatter Wasseroberfläche dem Blick senkrecht nach unten entspricht, bis zum Brewsterwinkel monoton an und erreicht dort ein Maximum von  $DoLP = 1$ , d.h. das Licht ist wie oben beschrieben vollständig polarisiert. Bei noch größeren Winkeln fällt der DoLP wieder ab.

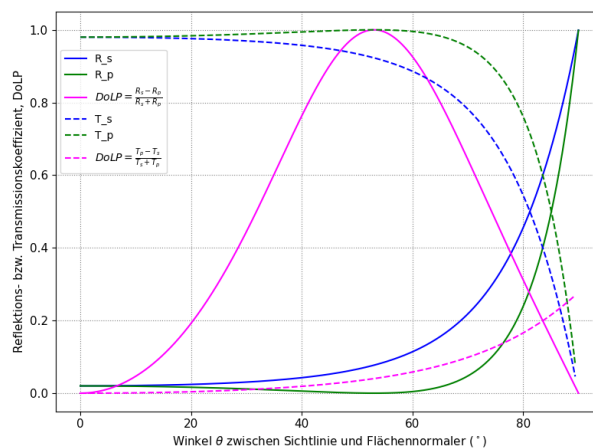


Abbildung 13: Reflexions- und Transmissionskoeffizienten sowie DoLP als Funktion des Winkels  $\theta$ .

Aufgrund des Maximums beim Brewsterwinkel ergibt sich die bereits unter Kapitel 1.4 beschriebene Mehrdeutigkeit, wenn der Winkel  $\theta$  aus einer Messung des DoLP abgeleitet werden soll. Für die Grundlagenuntersuchungen in REMAP wurde diese Mehrdeutigkeit aber zunächst umgangen, indem man sich auf glatte Wasseroberflächen und eine Kamera-Messgeometrie auf der aufsteigenden Flanke des DoLP beschränkt hat.

Die gestrichelten Linien in Abbildung 13 beschreiben die Fresnel-Transmissionskoeffizienten für den Übergang von Wasser zu Luft, d.h. den Beitrag des aus dem Wasserkörper aufsteigenden Lichts, der beim Wiederaustritt an der Oberfläche gebrochen wird. Für dieses Licht ist  $T_p > T_s$  für alle Winkel  $\theta$ , d.h. dieses Licht ist parallel zur Brechebene polarisiert. Zudem ergibt sich ein anderer Verlauf des DoLP (magentafarbene gestrichelte Linie), ohne Brewsterwinkel und monoton steigend.

Das Licht in jeder realen REMAP-Messung von der Drohne aus besteht aus einer Überlagerung von Licht, das an der Oberfläche reflektiert wurde, und Licht aus dem Wasser. Da beide Komponenten

<sup>1</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Arctan2>



einen anderen Polarisationszustand haben und einen anderen Verlauf des DoLP aufweisen, lässt sich aus einer Messung des DoLP der Winkel  $\theta$  nicht bestimmen. Die in REMAP anvisierte Lösung dieses Problems besteht in spektraler Langpass-Filterung. Die Absorption von flüssigem Wasser steigt mit zunehmender Wellenlänge stark an, wie Abbildung 14 zeigt, d.h. bei langen Wellenlängen steigt das Verhältnis von an der Oberfläche reflektiertem Licht relativ zu dem Licht aus dem Wasser an, da letzteres im Wasser selbst absorbiert wird. Die gemessene DoLP-Kurve wird somit dem erwarteten Verlauf, wie ihn die spiegelnde Reflexion verursacht, immer ähnlicher. Dies ist in Abbildung 15 gezeigt, in der links der gemessene (und kalibrierte) DoLP als Funktion von  $\theta$  ohne Langpassfilter über einer glatten Wasseroberfläche dargestellt ist. Das Teilbild in der Mitte zeigt dieselbe Messung, aber mit einem Farbfilter mit 850 nm cut-on Wellenlänge von der Firma Thorlabs (Modell FGL850), und das rechte Teilbild ist dieselbe Messung, aber mit einem hard-coated Interferenzfilter (Firma Thorlabs, Modell FELH0850). Die gemessenen Transmissionskurven beider Filter sind in Abbildung 14 dargestellt. Beide Filter blockieren Licht im sichtbaren Spektralbereich und lassen nur Wellenlängen ab 850 nm transmittieren, wo die Absorption durch Wasser groß ist. Der hard-coated Filter hat dabei eine wesentlich bessere Unterdrückung und eine steilere Flanke bei 850 nm als der Farbfilter. Als Konsequenz daraus ist die Unterdrückung des Anteils von Licht aus dem Wasser bei Einsatz des hard-coated Filters besser als beim Farbfilter. Bei dem hier durchgeführten und in Abbildung 15 gezeigten Test unter Laborbedingungen weist zwar schon das mit dem Farbfilter gemessene DoLP eine hervorragende Übereinstimmung mit dem erwarteten Verlauf auf, bei Feldexperimenten (siehe unten „Einfluss der Umweltbedingungen“) zeigte sich aber, dass unter Realbedingungen der hard-coated Filter benötigt wird.

Abbildung 15 zeigt ebenfalls, dass die Messungen mit Langpass-Filtern deutlich mehr Rauschen aufweisen, als die Messung ohne Filter. Als Konsequenz daraus wurde später auch für die berechneten Oberflächennormalen ein starkes Rauschen gefunden, da diese auf dem DoLP als Input basieren.

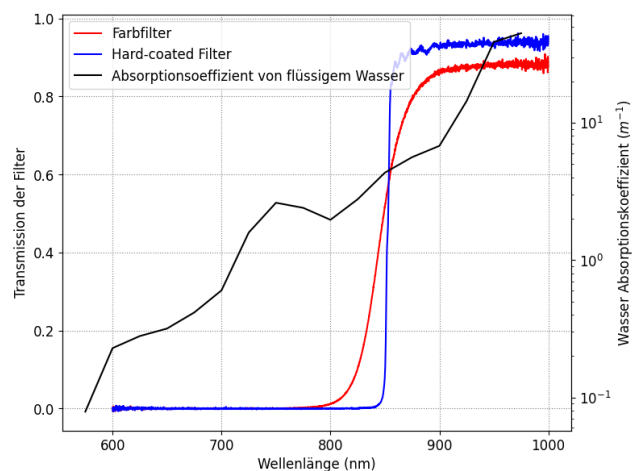


Abbildung 14: Spektrale Transmission der verwendeten 850 nm Langpassfilter (linke y-Achse) und Absorptionskoeffizient von flüssigem Wasser (rechte y-Achse, logarithmische Auftragung). Quelle: Peters et al. (in prep.)

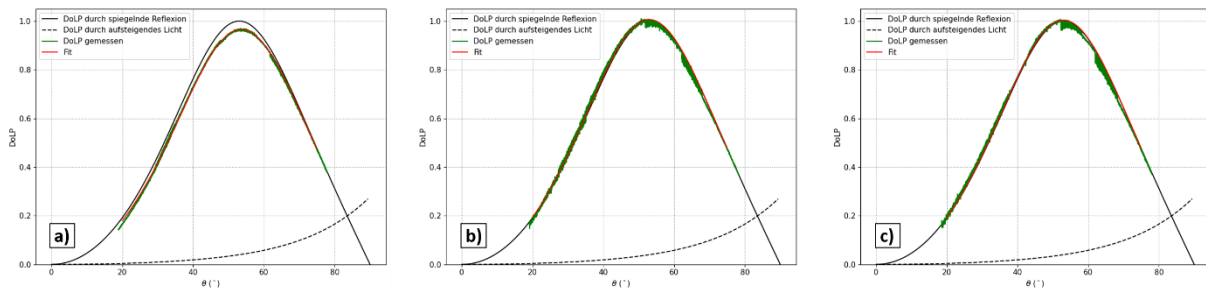


Abbildung 15: Als Funktion von  $\theta$  gemessenes DoLP über einer glatten Wasseroberfläche. Die Messungen fanden unter Laborbedingungen in einem ca. 30 cm tiefen Wassertank mit schwarzem Beckenboden statt, d.h. die Reflexion des Bodens war gering. Das verwendete Wasser war klar (Leitungswasser). Die rote Linie ist ein Fit an die jeweiligen Messdaten (in grün dargestellt). a) Messung ohne Filter, b) mit 850 nm Langpass-Farbfiler, c) mit 850 nm hard-coated Filter. Quelle: Peters et al. (in prep.)

### Kalibration der Kamera:

Die verwendete PolarSens-Kamera ist optimiert für den sichtbaren Spektralbereich und die Effizienz ihres Polarisationsfilter-Arrays sinkt mit zunehmender Wellenlänge. Bei Verwendung der Langpassfilter kommt es also zu viel größeren Leckintensitäten von Licht der falschen Polarisationsrichtung und der gemessene DoLP ist kleiner als er sein müsste. Darüber hinaus stellen die Filter zusätzliche optische Bauteile im Strahlengang da, und wenn Licht auf eine Grenzfläche trifft, treten wiederum Polarisierungseffekte gemäß der Fresnel'schen Formeln auf. Jedes Objektiv ist daher selbst eine Polarisationsquelle (Chipman2016), und jedes weiterhin integrierte optische Bauteil verändert die Polarisierung zusätzlich. Insbesondere der hard-coated Filter, der auf Interferenzeffekten basiert, ist in dieser Hinsicht problematisch. Aufgrund dessen wurde die PolarSens mit installierten Filtern umfangreichen Charakterisierungsmessungen und Kalibrationen unterzogen.

Input für die Kalibration waren Messungen mit der PolarSens auf eine weiße Wand sowie nach oben auf eine weiße Wolkendecke gerichtet, wobei die Kamera unmittelbar hinter einem externen Polarisationsfilter (Polarizer) installiert war. Das von der Kamera empfangene Licht war also vollständig linear polarisiert und das Bildfeld homogen ausgeleuchtet. Der Polarizer wurde in  $10^\circ$ -Schritten von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  gedreht und jeweils ein Bild aufgenommen. Zur Reduktion von zeitlichem Rauschen bestand jedes Bild aus der Mittelung über 10 Einzelbilder. Basierend auf dieser Messsequenz wurde ein in der Literatur wohlbekannter Kalibrationsalgorithmus benutzt (Powell2013, Lane2022), der für jeden Superpixel eine  $4 \times 4$ -Kalibrationsmatrix liefert und die gemessenen Intensitäten kalibriert. Eine beispielhafte Kalibration ist in Abbildung 16 gezeigt, in der gemessene Intensitäten (gestrichelte Linien) und kalibrierte Intensitäten (durchgezogene Linien), sowie der damit berechnete DoLP, der AoLP und die Stokes-Elemente gegenübergestellt sind. Im linken oberen Teilbild ist zu erkennen, dass die unkalibrierten Intensitäten nicht auf Null zurückgehen, was an den oben angesprochenen Leckintensitäten liegt. Nach der Kalibration gehen die Intensitäten hingegen auf Null zurück und werden im Maximum angehoben und homogenisiert. Der unkalibrierte DoLP (rechtes unteres Teilbild) weist starke Schwankungen je nach Polarisationsrichtung auf, und erreicht im Maximum lediglich Werte von ca. 0.94. Im Gegensatz dazu zeigt der mit den kalibrierten Intensitäten berechnete DoLP nur noch schwache Schwankungen um einen Mittelwert von DoLP = 1. Die Schwankungen im AoLP (rechtes unteres Teilbild) werden von  $0.75^\circ$  auf  $0.25^\circ$  reduziert.



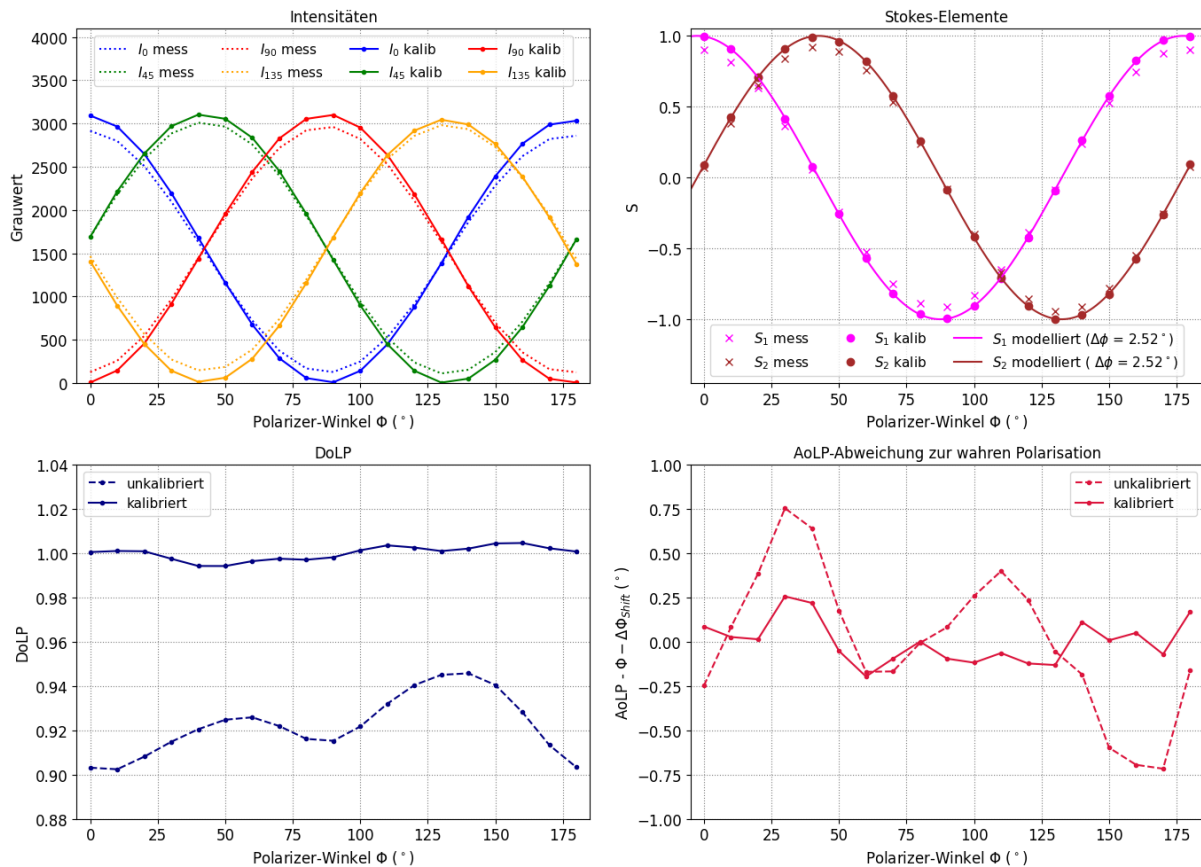


Abbildung 16: Beispielhafte Kalibration für eine Blendenzahl von  $f/4$  und mit installierten hard-coated Filter. Gezeigt sind jeweils Mittelwerte der zentralen  $100 \times 100$  Pixel. Oben links: Unkalibrierte (gemessene) und kalibrierte Intensitäten. Rechts oben: Stokes-Elemente  $S_1$  und  $S_2$  vor und nach der Kalibration. Links unten: DoLP kalibriert und unkalibriert. Rechts unten: AoLP kalibriert und unkalibriert. Quelle: Peters et al. (in prep.)

Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen war der Einfluss der Blendenzahl. Eine kleine Blendenzahl ist wünschenswert, um einen möglichst großen Lichtdurchsatz zu ermöglichen und die Belichtungszeit klein zu halten. Andererseits bedeutet eine weit geöffnete Blende, dass die Winkel zwischen Lichtstrahlen und Optiken größer werden, womit gemäß Fresnel'schen Formeln wiederum größere Eigen-Polarisationseffekte des Objektivs zu erwarten sind. Außerdem empfängt ein einzelnes Pixel Licht aus einem Kegel, dessen Grundfläche die Blendenöffnung und dessen Höhe der Abstand zur Blende (im REMAP-Aufbau gleich der Brennweite) ist. Bei kleiner Blendenzahl (weit geöffneter Blende), wird dieser Kegel größer, was ebenfalls zu Messfehlern führen kann, da die Polarisationsfilter eine vom Winkel abhängige Effizienz haben. Zusätzlich sind Mikro-Linsen vor jedem Pixel angebracht und es kann ggf. zu Fokussierungsfehlern kommen, die sich mit geöffneter Blende verschlimmern. Aus diesen Gründen wurde die in Abbildung 16 beispielhaft für  $f/4$  gezeigte Kalibration für mehrere Blendenzahlen von  $f/1.4$  bis  $f/16$  wiederholt. Die größten DoLP-Fehler von fast 50% wurden für den hard-coated Filter und kleine Blendenzahlen von  $f/1.4$  gefunden. Bei großen Blendenzahlen ging der Fehler deutlich zurück und war insgesamt bei Verwendung des Farbfilters oder ganz ohne Filter noch kleiner. Einheitlich ergab sich für alle Konfigurationen (ohne Filter, Farbfilter, hard-coated Filter) eine deutliche Zunahme des DoLP-Fehlers für kleine Blendenzahlen, während ein relativ konstantes Fehler-Niveau für Blendenzahlen ab  $f/4$  gefunden wurde. Eine Blendenzahl von  $f/4$  scheint also der beste Kompromiss zu sein aus möglichst kleinem Fehler und möglichst großem Lichtdurchsatz (kurze Belichtungszeit). Dieses Ergebnis muss aber abgewogen werden gegen die Notwendigkeit noch schnellerer Messungen, um die Bewegungsunschärfe bei bewegter Oberfläche zu verringern. Im weiteren Verlauf der

Genauigkeitsstudien und der Untersuchung verschiedener Umwelteinflüsse wurde sich daher auf glatte Wasseroberflächen beschränkt und eine Blendenzahl von  $f/4$  verwendet.

Zusammenfassend liegen für  $f/4$  typische Fehler nach erfolgter Kalibration im Bereich von  $0.1^\circ - 0.3^\circ$  in der Bildmitte, sowohl für den AoLP sowie auch den DoLP (Achtung, der DoLP ist nicht in der Einheit Grad, wurde hier aber für eine typische REMAP-Messgeometrie in Grad umgerechnet). An den Bildrändern und Ecken ergaben sich größere Fehler im Bereich von  $0.5^\circ - 1^\circ$ .

### **Einfluss der Umweltbedingungen:**

Die zwei bedeutendsten untersuchten Umwelteinflüsse, die Auswirkungen auf die Messungen haben, sind:

1. Gewässereigenschaften, speziell der Rückstreuung an Partikeln
2. Die Eigenschaften der einfallenden Himmelsstrahlung

### Gewässereigenschaften, speziell der Rückstreuung an Partikeln

Der erste Punkt wurde qualitativ untersucht, indem Feldmessungen mit der PolarSens im Hafenbecken vor dem DLR-MI Institutsgebäude in Bremerhaven durchgeführt wurden. Die Wassertrübung und die Partikelkonzentration ist hier so hoch, dass sich das Gewässer für REMAP-Messungen nicht eignet, es stellt dadurch aber einen Extremfall dar, der sich mit den oben gezeigten idealen Labormessungen (klares Wasser) in Abbildung 15 vergleichen lässt. Der Aufbau ist in Abbildung 17a gezeigt. Es wurden Bilder mit der PolarSens entlang der dargestellten weißen Linie vom Horizont bis annähernd Nadir gemacht. Abbildung 17b zeigt beispielhaft den DoLP einer PolarSens-Aufnahme in  $-5^\circ$  Elevation (Kameraneigung). Für die Mitte jeder Pixelzeile wurde dann die vertikale Blickrichtung berechnet. Da die Wasseroberfläche in diesem Versuch relativ glatt ist, kann damit der Winkel  $\theta$  zwischen der jeweiligen Sichtlinie und der Oberflächennormalen berechnet werden. Dies wurde für alle Bilder gemacht und  $\theta$  dann gegen den DoLP in der Mitte einer jeden Pixelzeile geplottet (dieselbe Prozedur wurde für die Labormessungen in Abbildung 15 durchgeführt). Das Ergebnis ist in Abbildung 18 dargestellt, die 6 Teilbilder entsprechen Messungen mit verschiedenen spektralen Langpassfiltern.

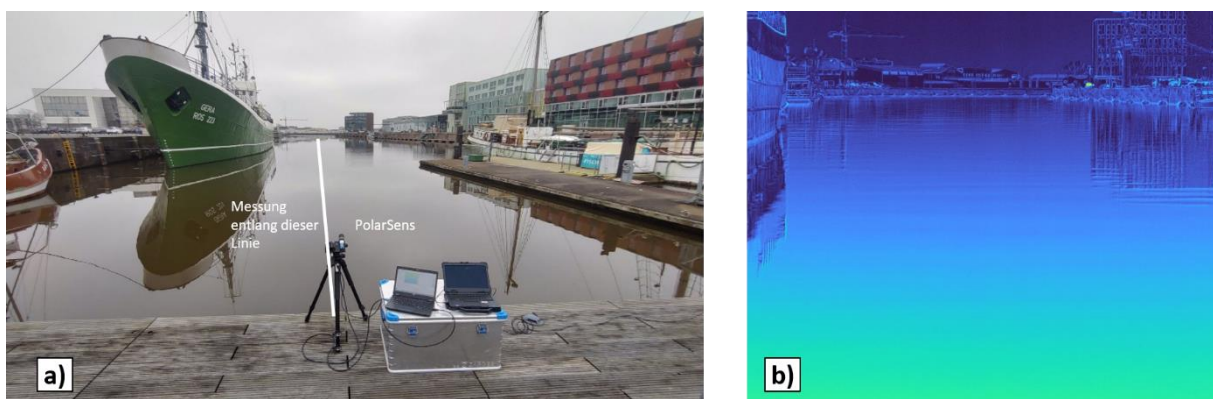


Abbildung 17: a) Aufbau der Messungen im Fischereihafen Bremerhaven. b) Beispielbild des gemessenen DoLP in  $-5^\circ$  Elevation (blaue Farben bedeuten kleines DoLP, helle Farben ein größeres DoLP).

Im Vergleich mit Abbildung 15 zeigen sich in Abbildung 18 deutlich stärkere Abweichungen vom erwarteten Verlauf des DoLP. Dies ist besonders deutlich beim Vergleich von Teilbild a, d.h. der Messung ohne Filter, der im Labortest mit klarem Wasser (und schwarzem Beckenboden) schon deutlich näher am erwarteten DoLP lag als beim Feldtest. Und während bereits der 850 nm Farbfilter

im Klarwasser-Labortest (Abbildung 14b) ausreichte, um eine sehr gute Übereinstimmung zu erzielen, zeigt die entsprechende Kurve in Abbildung 18b eine starke Abweichung. Speziell das Maximum beim Brewsterwinkel ist deutlich kleiner als 1, was auf eine Beimischung von Licht aus dem Wasser schließen lässt. Im Gegensatz zum Labortest wurden beim Feldtest weitere Langpass-Filter noch größerer cut-on Wellenlänge verwendet (Abbildung 18c-f). Obwohl diese eine nochmalige Verbesserung bringen, liefert keiner eine hinreichende bzw. ähnlich gute Übereinstimmung wie die 850 nm Filter im Klarwasser-Labortest. Speziell der 1000 nm Farbfilter (Teilbild f) scheint wieder eine größere Abweichung zu zeigen als der 900 nm bzw. 950 nm hard-coated Filter (Teilbilder d und e). Dies ist hochinteressant, konnte im Rahmen von REMAP aber nicht mehr abschließend untersucht werden. Der Grund kann entweder in der besseren Unterdrückung der hard-coated Filter liegen, oder es kann auf eine erhöhte Rückstreuung bei langen Wellenlängen hinweisen.

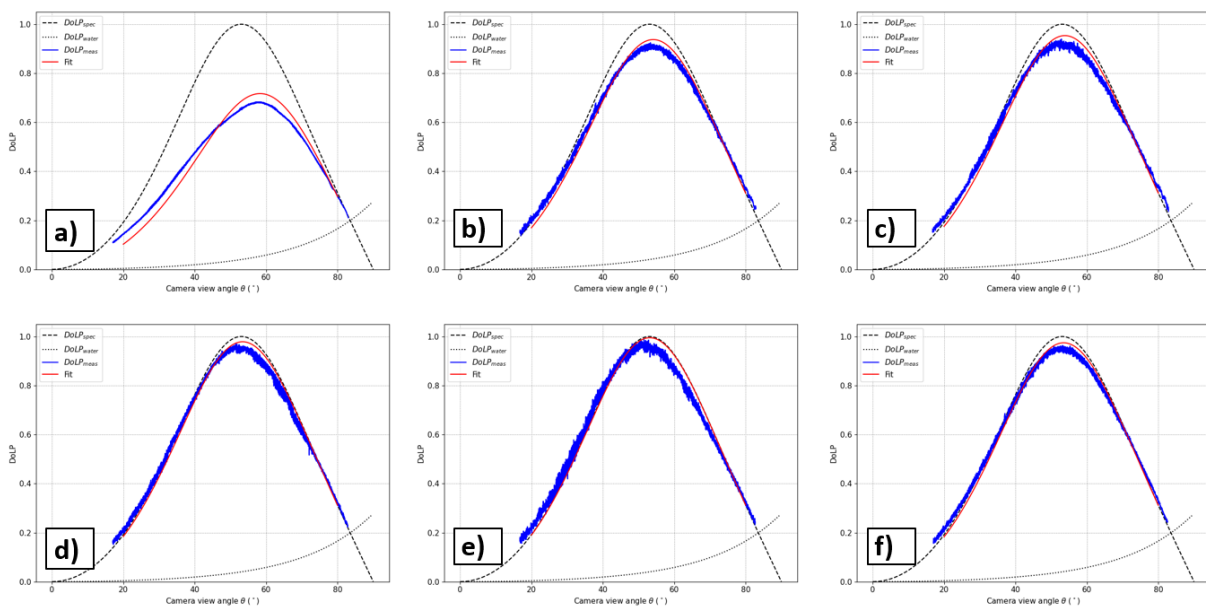


Abbildung 18: Als Funktion von  $\theta$  gemessenes DoLP über der in Abbildung 17a gezeigten Wasseroberfläche in einem Feldtest. a) Ohne spektralen Langpassfilter, b) mit 850 nm Farbfilter, c) mit 850 nm hard-coated Filter, d) mit 900 nm hard-coated Filter, e) mit 950 nm hard-coated Filter, f) mit 1000 nm Farbfilter. Die gemessenen Intensitäten wurden jeweils kalibriert.

Der Test wurde bei stabilen Bedingungen unter einer geschlossenen Wolkendecke vorgenommen. Während des Tests fanden begleitende Umweltmessungen statt. Die über den gesamten Spektralbereich gemittelte Irradianz (in  $W/m^2$ ) der einfallenden Himmelstrahlung wurde mit einem Pyranometer gemessen und ist in Abbildung 19a dargestellt. Das Ergebnis zeigt, dass die Bedingungen während des gesamten Zeitraums annähernd konstant waren. Die Irradianz ist vergleichsweise niedrig, was aber schlicht am Datum des Tests liegt (Ende Februar). Abbildung 19b zeigt spektrale Radianzen, die mithilfe zweier Spektrometer für den sichtbaren (vis) sowie den nahinfraroten (nir) Spektralbereich gemessen wurden. Mit einer an die Spektrometer angeschlossenen optischen Faser wurde das einfallende Himmelslicht dabei in  $30^\circ$  Elevation gemessen (blaue Linie) sowie das Licht von der Wasseroberfläche (grüne Linie), das eine Überlagerung des an der Oberfläche reflektierten Himmelslichts und Licht aus dem Wasser ist. Diese Radianzen wurden auf die gesamte aus dem oberen Halbraum einfallende Irradianz normiert, die mit einem Kosinuskorrektor vor der optischen Faser in Zenit-Richtung gemessen wurde. Das einfallende Himmelslicht (blaue Kurve) zeigt einen flachen spektralen Verlauf, was für weiße (bzw. graue) Wolken zu erwarten ist, da Mie-Streuung an Wolken

der dominierende Effekt ist und nur eine schwache Abhängigkeit von der Wellenlänge hat. Das von der Wasseroberfläche empfangene Licht ist im nir schwer zu interpretieren, da es hier durch die starken Absorptionsstrukturen des Wassers dominiert wird, der Abfall im vis-Bereich von 400-600 nm ist aber auf Wasserinhaltsstoffe zurückzuführen.

Auf eine genauere Analyse der Wasserinhaltsstoffe wurde verzichtet, das Ergebnis ist aber in Einklang mit dem durch das bloße Auge vermittelten Eindruck einer hohen Partikelkonzentration (siehe das Foto des Aufbaus in Abbildung 17a). Infolgedessen wird mehr Licht aus dem Wasser zurückgestreut, als es bei den Klarwassermessungen unter Laborbedingungen in Abbildung 15 der Fall war. Es lässt sich spekulieren, dass diese erhöhte Rückstreuung sowohl im vis als auch im nir erfolgt, was erklären würde, warum in den Labormessungen mit klarem Wasser bereits der 850 nm Filter ausreicht, um eine sehr gute Übereinstimmung mit dem erwarteten DoLP-Verlauf zu liefern, während in Abbildung 17 keiner der Filter eine hinreichende Übereinstimmung liefert. Die Berechnung der lokalen Oberflächenneigung aus Polarisationsmessungen funktioniert damit für klares Wasser, nicht aber für das hier benutzte Hafengewasser. Wie oben angesprochen stellt das Hafengewasser aber einen Extremfall dar, bei dem das REMAP-Retrieval zur Berechnung der Wassertiefe ohnehin nicht eingesetzt werden würde.

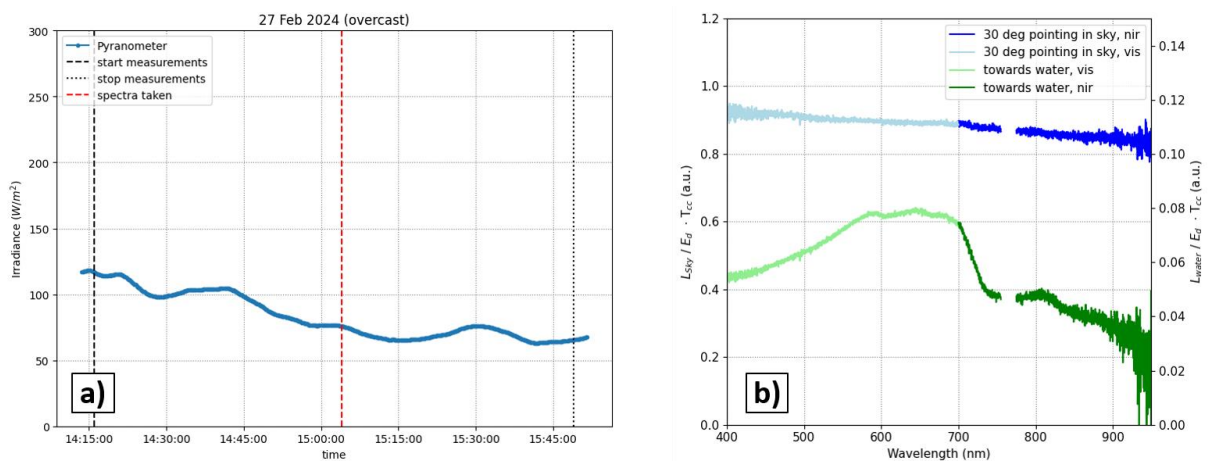


Abbildung 19: a) Mit einem Pyranometer gemessene Irradianz ( $W/m^2$ ) der einfallenden Himmelsstrahlung während des gesamten Zeitraums des Feldtests (Beginn und Ende sind markiert durch gestrichelte Linien). b) Mithilfe zweier Spektrometer für den sichtbaren (vis) und nahinfraroten (nir) Spektralbereich gemessene Spektren des einfallenden Himmelslichts (blau) sowie der Wasseroberfläche (grün), jeweils normiert auf die spektrale Irradianz, die mit denselben Spektrometern in Zenit-Richtung und Kosinuskorrektor gemessen wurde.

### Die Eigenschaften der einfallenden Himmelsstrahlung

Der zweite untersuchte Umwelteinfluss, die Abhängigkeit von den Eigenschaften des einfallenden Lichts, wurde wiederum unter freiem Himmel durchgeführt, allerdings mit einem Wassertank anstatt des Hafensbeckens. Der Tank wurde zu ca. 50 cm mit klarem Leitungswasser gefüllt, für das die Labormessungen in Abbildung 15 bereits eine hervorragende Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und erwarteten DoLP zeigten. Im Unterschied zu den Labormessungen in Abbildung 15 wurde dieser Test aber nicht mit künstlichem Licht, sondern bei realer Einstrahlung unter zwei verschiedenen Bedingungen durchgeführt, einmal bei blauem Himmel und einmal bei geschlossener Wolkendecke. Außerdem war das Klarwasser-Laborexperiment in Abbildung 15 mit einem geschwärzten Beckenboden durchgeführt worden, so dass der Beitrag von Licht aus dem Wasser nur durch Rückstreuung aus dem Wasserkörper selbst stammte. Im Gegensatz dazu ist bei REMAP aber



eine gewisse Reflektion des Meeresbodens zu erwarten. Aus diesem Grund wurden schwarz-weiße bzw. schwarz-graue Schachbrettmuster auf dem Boden des Wassertanks befestigt. Der Messaufbau ist in Abbildung 20 gezeigt.

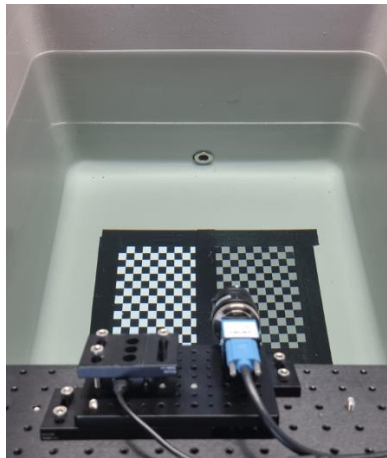


Abbildung 20: Aufbau der Wassertank-Messungen zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Bedingungen der Einstrahlung (blauer Himmel und Bewölkung).

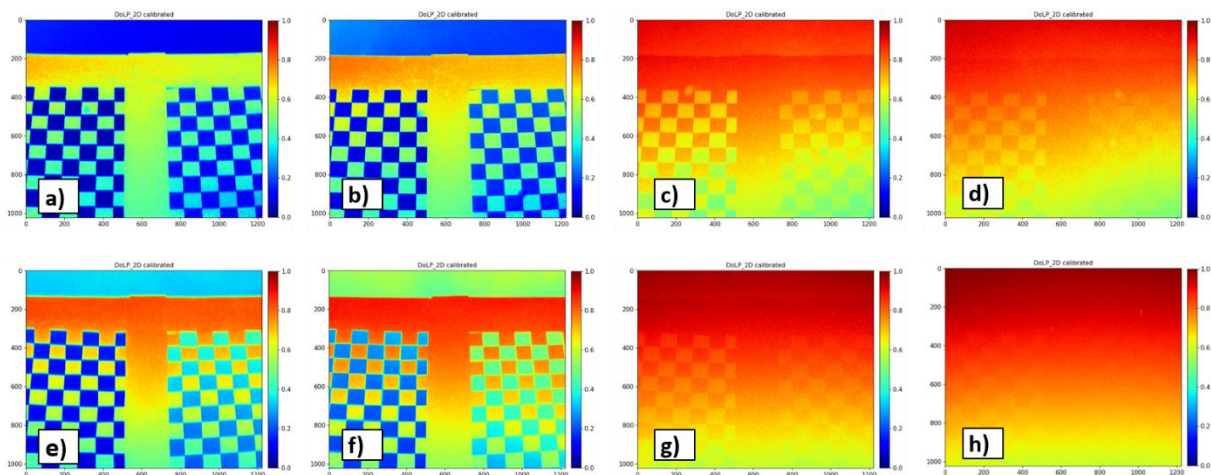


Abbildung 21: Aufgenommener DoLP in dem in Abbildung 20 gezeigten Experiment unter freiem Himmel. a-d) Blauer Himmel, e-h) bedeckter Himmel. a, e) ohne Langpassfilter, b, f) mit 650 nm Farbfilter, c, g) mit 850 nm Farbfilter, d, h) mit 850 nm hard-coated Filter. Quelle: Peters et al. (in prep.)

Abbildung 21 zeigt Aufnahmen des DoLP unter blauem Himmel (oben) und bedecktem Himmel (unten). Um den Übergang von den Messungen ohne Filter (links, Teilbilder a und e) zum 850 nm hard-coated Filter (rechts, Teilbilder d und h) besser zu illustrieren, wurde zusätzlich jeweils eine Messung mit 650 nm Farbfilter durchgeführt (Teilbilder b und f). Die Schachbrettmuster am Beckenboden sind in beiden Messreihen eindeutig als Artefakte zu erkennen, v.a. wenn kein spektraler Langpassfilter zur Unterdrückung von Licht aus dem Wasser verwendet wird (linke Teilbilder a und e). Während bei den Messungen unter blauem Himmel aber diese Artefakte auch bei Einsatz der spektralen Langpassfilter erhalten bleiben (Teilbilder b, c, d), verschwindet das Artefakt des schwarz-grauen Schachbretts vollständig bei Einsatz des 850 nm hard-coated Filters unter der Wolkendecke (Teilbild h), während der 850 nm Farbfilter (Teilbild g) noch beide Artefakte zeigt. Auch das schwarz-weiße Muster in Teilbild h ist deutlich unterdrückt und nur noch blass zu erkennen. Da in den REMAP-Messungen kein

schneeweißer Meeresboden zu erwarten ist, wurde dieses Ergebnis als ausreichend angesehen und somit der Einsatz des 850 nm hard-coated Filters empfohlen.

Genau wie bei den Messungen im Hafengebäck, wurde die Radianz der einfallenden Strahlung als Funktion der Wellenlänge mithilfe von zwei Spektrometern (für den vis- und den nir-Bereich) aufgenommen. Wiederum mithilfe einer optischen Faser, wurde die Radianz  $L_{Sky}$  in 30° Elevationswinkel gemessen, da Licht aus etwa dieser Richtung spiegelnd an der Wasseroberfläche reflektiert mit der PolarSens aufgenommen wurde und zu den in Abbildung 21 gezeigten DoLPs führte. Ebenfalls wie in den Hafengebäck-Tests wurde diese Radianz  $L_{Sky}$  normiert auf die aus der gesamten oberen Halbkugel eingestrahlte Irradianz  $E_d$ , die mit einem Kosinus-Korrektor vor der optischen Faser in Zenit-Richtung gemessen wurde. Das resultierende Verhältnis  $L_{Sky}/E_d$  ist für beide Messreihen in Abbildung 22 gezeigt.

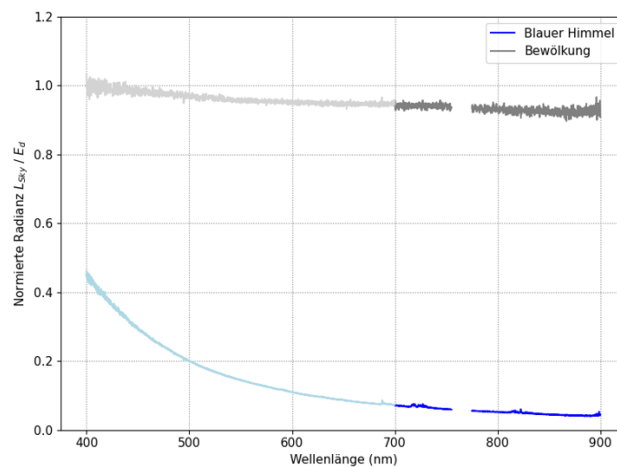


Abbildung 22: Gemessene Radianzen als Funktion der Wellenlänge und normiert auf die spektrale Irradianz aus dem gesamten oberen Halbraum. Quelle: Peters et al. (in prep.)

Das Spektrum der normierten Radianz bei bewölktem Himmel ist ähnlich zu den Bedingungen während des Hafentests und weist erwartungsgemäß nur eine sehr geringe Abhängigkeit von der Wellenlänge auf, was insbesondere bedeutet, dass es bei Wellenlängen  $> 850$  nm genauso viel Licht wie bei kleineren Wellenlängen gibt. Im Gegensatz dazu fällt das Spektrum der normierten Radianz bei blauem Himmel stark mit der Wellenlänge  $\lambda$  ab. Dies ist eine Folge der  $1/\lambda^4$ -Abhängigkeit von Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen, die vorzugsweise kleinere Wellenlängen streuen und so die blaue Farbe des Himmels verursachen. Infolgedessen steht bei Wellenlängen  $> 850$  nm nun weniger Licht als bei kleineren Wellenlängen zur Verfügung. Kleinere Wellenlängen (sichtbarer Spektralbereich) stellen aber gerade das zu blockierende Signal dar, weil sie einen vergleichsweise hohen Anteil von Licht aus dem Wasser enthalten. Im Ergebnis ist also das Verhältnis von Nutzsignal ( $> 850$  nm) zu Störsignal ( $< 850$  nm) viel besser bei bewölktem Himmel als bei blauem Himmel. Ein weiterer wichtiger Faktor ist, dass die Radianz aus der einfallenden Richtung (hier 30°) höher ist bei Bewölkung als bei blauem Himmel. Dies führt zu stärkeren Reflexionen der Wasseroberfläche im bewölkten Szenario. In Summe stellen diese beiden Gründe die Ursache dafür dar, dass die Artefakte des Schachbrettmusters in Abbildung 21 bei bewölktem Himmel und genügend großer Langpass-Filterung verschwinden, während sie bei blauem Himmel erhalten bleiben.

Eine weitere Beobachtung aus Abbildung 21 ist, dass der dort gezeigte DoLP im bewölkten Szenario symmetrisch zur Bildmitte ist, während er bei blauem Himmel einen schiefen Verlauf zeigt mit höheren Werten in der linken oberen Bildecke und kleinsten Werten in der unteren rechten Bildecke. Der Grund ist, dass der bewölkte Himmel aufgrund von multiplen Mie-Streuungen innerhalb der Wolkendecke

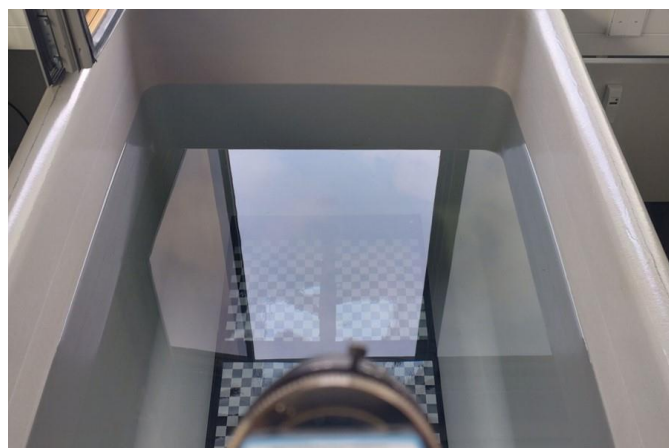
unpolarisiertes Himmelslicht generiert. Im Gegensatz dazu wirkt die Rayleigh-Streuung polarisierend und das einfallende Licht ist abhängig von der Einfallsrichtung partiell polarisiert im Falle des blauen Himmels. Diese Polarisation des einfallenden Lichtes wird bei der Reflexion an der Wasseroberfläche nicht zerstört, so dass sie einen systematischen Fehler in den Messungen verursacht. Im Ergebnis funktioniert die Ableitung der lokalen Neigung aus Polarisationsmessungen damit nur im bewölkten Szenario, ohne dass weitere Annahmen über die Polarisation des Himmelslichts getroffen werden wie beispielsweise ein Rayleigh-Modell (siehe Kapitel 1.4).

#### **Analyse der erreichbaren Genauigkeit:**

In einer abschließenden Genauigkeitsuntersuchung wurden für jeden Superpixel eines PolarSens-Bildes, also mit einer Auflösung von 1224 x 1024, Oberflächennormalen berechnet. Dazu wurde ein Formelwerk erarbeitet, das die paraxiale Korrektur (siehe Kapitel 1.4) enthält, und die Oberflächennormalen in einem kartesischen *xyz-Weltkoordinatensystem* liefert, wobei die x-Achse von links nach rechts, die y-Achse nach oben (senkrecht zur Wasseroberfläche in den Zenit), und die z-Achse von der Kamera weg zum Horizont (parallel zur Wasseroberfläche) zeigt. Aufgrund des Umfangs sei hierfür auf die Veröffentlichung in Peters et al. (in prep.) verwiesen.

Aufgrund der oben beschriebenen Einschränkung auf lange Belichtungszeiten war eine unbewegliche und glatte Wasseroberfläche notwendig. Im Gegensatz zu einer bewegten Oberfläche, erlaubt dies auch direkt eine bekannte „Ground Truth“, also Orientierung der Oberflächennormalen, die alle vertikal nach oben zeigen und somit parallel zur y-Achse stehen. Die Abweichung einer berechneten Oberflächennormalen von der y-Richtung wird durch die Winkel  $w_{yx}$  und  $w_{yz}$ , die die Auslenkung in der yx-Ebene (also die Neigung nach links/rechts) und in der yz-Ebene (Neigung nach vorne/hinten) beschreiben.

Um eine unbewegliche und glatte Oberfläche zu garantieren, wurden die Messungen im Labor durchgeführt, wobei trotzdem reales Himmelslicht in einem bewölkten Szenario genutzt werden konnte. Das Wasserbecken aus dem obigen Test wurde dazu vor einem geöffneten Fenster positioniert. Die PolarSens wurde mit 850 nm hard-coated Filter betrieben und die verwendete Blendenzahl betrug f/4. Der Messaufbau ist in Abbildung 23 gezeigt. Die Spiegelung des Himmelslichts durch das geöffnete Fenster ist deutlich zu erkennen.



*Abbildung 23: Aufbau für die Genauigkeitsabschätzung bei unbewegter und glatter Oberfläche. Das Nutzsignal ist die gut zu erkennende spiegelnde Reflexion des Himmelslichts durch das geöffnete Laborfenster.*

Abbildung 24 zeigt den in diesem Test gemessenen DoLP (Teilbild a), den AoLP (Teilbild c) sowie den Winkel  $\theta$  zwischen der jeweiligen Sichtlinie und der Oberflächennormalen (Teilbild c). Der Winkel  $\theta$  kann aus der bekannten Messgeometrie und dem gemessenen DoLP berechnet werden. In Teilbild d

ist der gemessene DoLP entlang einer Vertikalen durch die Bildmitte als Funktion von  $\theta$  geplottet und im Vergleich mit dem simulierten DoLP für spiegelnde Reflexion dargestellt. Der Vergleich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. In Teilbild e und f sind zur quantitativen Beschreibung der Messgenauigkeit die o.g. Winkel  $w_{yx}$  und  $w_{yz}$  abgebildet.

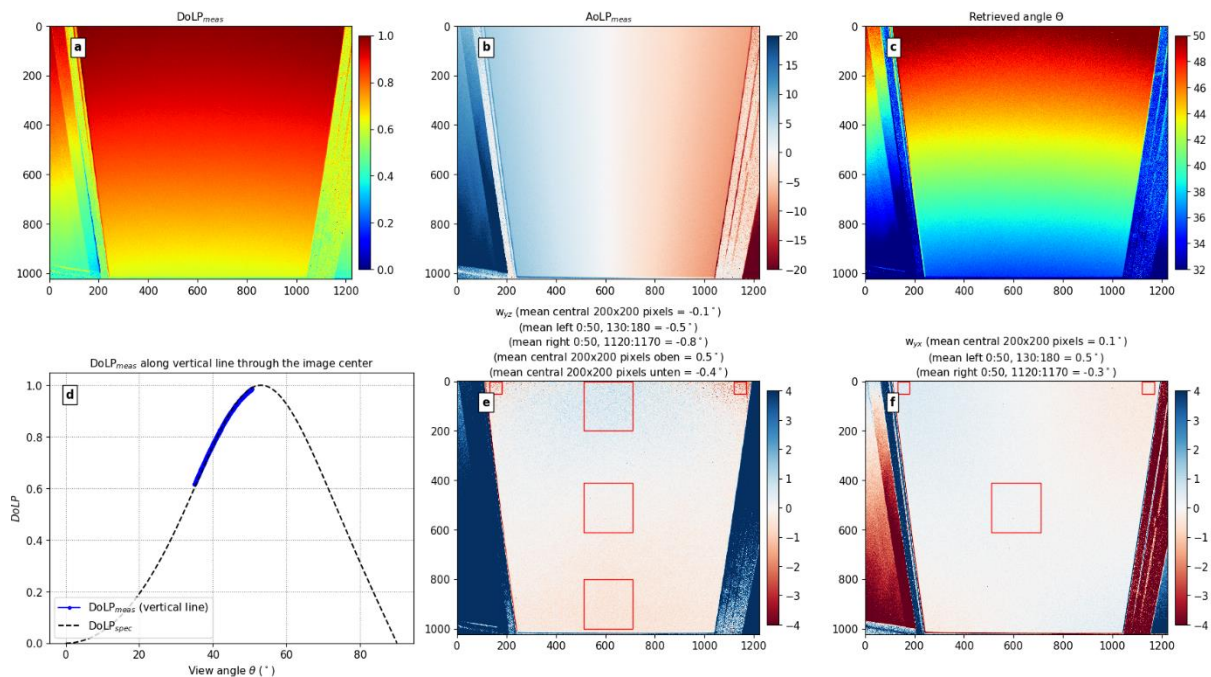


Abbildung 24: Gemessener DoLP (a) und AoLP (b). c) Mit DoLP und bekannter Messgeometrie berechnetes  $\theta$ . d) DoLP als Funktion von  $\theta$  entlang der Vertikalen durch die Bildmitte. e und f) Winkel  $w_{yz}$  und  $w_{yx}$  der berechneten Oberflächennormalen von der y-Richtung. In den rot markierten Bereichen wurden die Winkel zur quantitativen Beschreibung des Fehlers gemittelt sowie die Standardabweichung berechnet. Quelle: Peters et al. (in prep.)

Zusammenfassend ergibt sich, dass die Oberflächennormalen in der Bildmitte mit einer Genauigkeit von  $0.1^\circ \pm 0.2^\circ$  erhalten werden, wobei die erste Zahl den Mittelwert im rot markierten Bereich in Abbildung 24e und f in der Bildmitte angibt und die zweite Zahl die Standardabweichung. Zu den Bildrändern werden die Fehler größer ( $0.5^\circ \pm 0.4^\circ$ ). Die Fehler in den Bildecken sind noch größer (siehe rot markierte Bereiche), allerdings sind sie in dieser Messung eine Folge davon, dass sich  $\theta$  dem Brewsterwinkel nähert, wo die Steigung des DoLP als Funktion von  $\theta$  abnimmt. Dies ist in Teilbild d schön zu sehen. Im Umkehrschluss nimmt der Fehler eines Winkels  $\theta$  stark zu, wenn er aus einer Messung des DoLP nahe des Brewsterwinkels erfolgt. Die Abweichungen in den Ecken sind somit also nicht auf instrumentelle Unsicherheiten zurückzuführen, legen aber die klare Empfehlung nahe Messungen nahe des Brewsterwinkels zu vermeiden, da dies zu starken Unsicherheiten der Oberflächenneigung führt.

#### Gegenüberstellung zu den vorgegebenen Zielen:

Im Vergleich zum Projektplan ist feststellen, dass deutlich mehr und detailliertere Experimente und Grundlagenuntersuchungen zur Polarisation durchgeführt wurden als vorgesehen war. Der Grund ist, dass hier Synergieeffekte speziell zu Arbeiten am DLR-MI genutzt werden konnten. Darüber hinaus lieferten die Messungen zu diesem Thema Potential für mindestens eine wissenschaftliche Publikation (siehe Kapitel 2.6).



Das SMARTE Projektziel des Auf- und Ausbaus spezifischer Expertise in der Polarisations-Nutzung für die Entwicklung optischer Über- und Unterwasser-Sensorik, wurde somit vollumfänglich erreicht und übertroffen.

### 2.1.3 Umweltmessungen und Ground-Truth (speziell Sonar-Abtastung des Meeresbodens)

#### **Instrumente und Systeme zur Bestimmung der Ground Truth:**

Die Referenzmessungen im Zuge des REMAP-Projekts umfassten:

- Die Referenz-Bathymetrie an den Messstandorten (Turmmessungen und Befliegungen), durchgeführt mit Sonar
- Aufnahme relevanter Umweltparameter, durchgeführt mit Radiometern und Spektrometern (sowohl Über- als auch Unterwasser)

Da das Drohnen-getragene multispektrale REMAP-System auf die Bathymetrie-Erfassung abzielt, wurden mittels Multibeam-Sonar Referenz-Tiefenbestimmungen durchgeführt. Als Trägerplattform wurde das autonome Unterwasserfahrzeug (AUV) vom Modell „Seekatze“ der Firma Atlas Elektronik (siehe Abbildung 25) genutzt, das am DLR-MI wie in Kapitel 1.2 beschrieben zur Verfügung steht.



Abbildung 25: Absenken der Seekatze von der Kaimauer mit einem Kran.

Aufgrund der hochpräzisen Inertial-Sensorik der Seekatze lassen sich im Nachgang der Messkampagne die Fahrzeugbewegungen sehr zuverlässig und genau aus den Sonar-Messdaten herausrechnen, sodass eine Tiefengenauigkeit Nahe der Multibeam-Spezifikationen erreicht wird. Die Seekatze hat sich im Zuge des Projekts als besonders geeignet für die Referenzmessungen in den tieferen Bereichen gezeigt, so dass sich mit ihren Ergebnissen sehr gut studiert lässt, wo die multispektrale REMAP-Methode von der Drohe an ihre Grenzen kommt. Die Limitierung des AUV-Messbereichs auf Tiefen größer als ca. 0.8 m schloss andererseits aber den unmittelbaren Uferbereich aus. Gerade in diesem Bereich mit sehr guter Lichtverfügbarkeit ist jedoch grundsätzlich eine gute Genauigkeit der multispektralen Messmethode zu erwarten. Im Kontext des REMAP-Verbundprojektes stellt diese Erfahrung bereits den ersten Erfolg dar und demonstriert nachträglich nochmals den Bedarf eines Drohnen-getragenen multispektralen Systems, das in Konkurrenz zu Instrumenten wie eben Sonarsystemen auf AUVs steht. Das REMAP-System schließt somit eine Bedarfslücke im ufernahen Bereich, in dem zumindest autonome Unterwasserfahrzeuge nicht operieren können.

Zur Transmissionsmessung wurde das multispektrale Transmissiometer vom Modell „VIPER“ der Firma TriOS genutzt. Die große optische Pfadlänge von 250 mm unterstützt Messungen in klareren Gewässern, wie sie für REMAP von Interesse waren. Die spektrale Auflösung von 2.2 nm und der Messbereich von 360 nm bis 720 nm des Instruments haben sich als ausreichend für eine detaillierte Abbildung der Transmissionsspektren herausgestellt. Da das System extrem anfällig für Verunreinigungen und Ablagerungen der Gläser im optischen Pfad ist, wurden im Zuge einer studentischen Abschlussarbeit umfangreiche Strömungssimulationen (siehe Abbildung 26) mit dem Ziel einer optimierten Anströmung im AUV-Betrieb durchgeführt. Abbildung 27 zeigt die aus dieser Arbeit hervorgegangene Halterung für den Sensor an der Seekatze. Durch die spitz zulaufende Nase werden Verwirbelungen reduziert, während der nachfolgende Krümmer die Strömung quer zum optischen Glas bei reduzierter Verwirbelung im optischen Pfad führt.

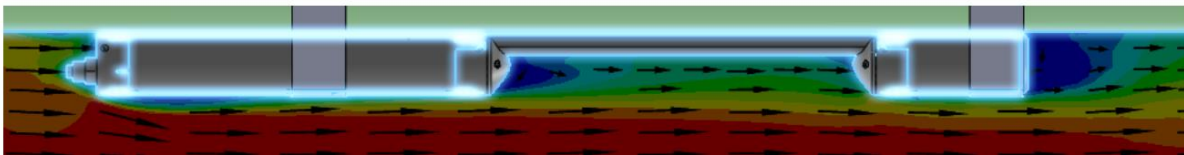


Abbildung 26: Strömungssimulation der Sensoranströmung ohne optimierende Bauteile. Die niedrige Strömungsgeschwindigkeit (dargestellt in blau) vor dem ersten Fenster (mittig) spricht für hohe Ablagerungswahrscheinlichkeiten und Verweilzeiten angeströmter Partikel.



Abbildung 27: Strömungsoptimierte AUV-Sensorhalterung für den TriOS Viper Transmissionsensor.



Abbildung 28: Einfache Konfiguration eines einzelnen RAMSES-Radiometers (oben) mit dem VIPER-Transmissiometer (unten) versorgt über ein Akkupack (mittig).

Für die Messung der Bestrahlungsstärke wurden im Zuge des Projekts zwei Radiometer vom Typ „RAMSES“ der Firma TriOS beschafft. Mit der gleichen spektralen Auflösung von 2.2 nm und einem Messbereich von 320 bis 950 nm decken diese Instrumente den von der REMAP-Kamera erfassten Spektralbereich ab. Als besonders wertvoll hat sich die doppelte Kalibrierung der Sensoren für den Einsatz in Luft und in Wasser (hier werden auf Grund der Brechungsindex-Änderung und der damit einhergehenden Änderung des Akzeptanzwinkels unterschiedliche Kalibrierungen benötigt) herausgestellt. Die Verfügbarkeit von 2 Sensoren dieser Art hat verschiedene Konfigurationen zur Messung folgender relevanter Messgrößen erlaubt:

- Sonneneinstrahlung unmittelbar über der Wasseroberfläche. Dies ist relevant um die allgemeine Lichtverfügbarkeit, sowie bei Bewölkung die Schwankungen der Helligkeit über den Messzeitraum zu erfassen.
- Die „downwelling Irradiance“ (Abwärts-gerichtete Bestrahlungsstärke) im Wasser. Hieraus ließen sich a) Schlüsse für den Anteil des an der Wasseroberfläche reflektierten Lichts und b) der Lichtverfügbarkeit in unterschiedlichen Tiefen ziehen.
- Die „upwelling Irradiance“ (Aufwärts-gerichtete Bestrahlungsstärke) im Wasser. Dies ist insbesondere zur Charakterisierung des Reflexionsspektrums des Meeresbodens relevant.

Insbesondere für die statischen Turmmessungen, die über einen längeren Zeitraum am selben Ort erfolgten, wurde eine verbesserte Variante der in Abbildung 28 dargestellten Konfiguration entwickelt und genutzt. Diese erlaubt den gleichzeitigen Betrieb aller 3 Sensoren (Transmissiometer und downwelling sowie upwelling Radiometer) entweder durch Herablassen von einem Boot oder durch Stativmontage. Die Daten werden auf internen Datenloggern gespeichert, die Stromversorgung erfolgt über einen wasserdichten Akkupack.

#### Feldexperiment Baggersee (Turmmessungen und Befliegung):

Am Baggersee Neuenwalde, Landkreis Cuxhaven, Niedersachsen, wurden Mitte Juni Aufnahmen der Multispektralkamera 1) über einen längeren Zeitraum von einem 10 m langen Stativ aus (Turmmessungen) und 2) bei einer Befliegung des Sees mit der Drohne aufgenommen.

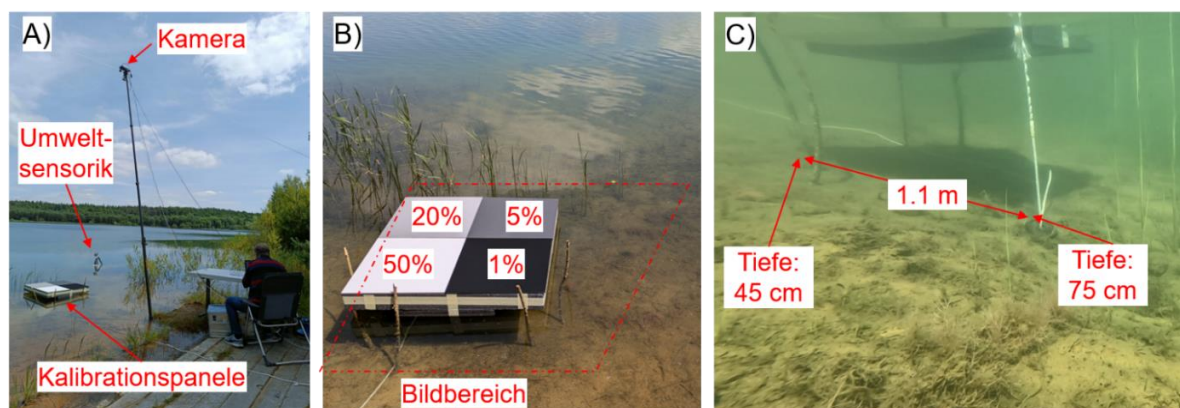


Abbildung 29: A) Aufbau der Turmmessungen im unmittelbaren Uferbereich. B) Kalibrationspanele mit markiertem Bildbereich der Multispektralkamera (gestrichelt). C) Unterwasseransicht der Böschung im Bildbereich.

Neben der Tiefenmessung hat das DLR spezifizierte Lambert'sche Reflexionspanels installiert, die über einen weiten spektralen Bereich denselben Reflexionsgrad besitzen. Die Panels wurden schwimmend im Bildfeld der Multispektralkamera installiert und liefern eine wichtige Kalibrationsgrundlage für die Anwendung des Tiefenbestimmungs-Algorithmus des Projektpartners EOMAP (siehe Bericht EOMAP). Die Turmmessungen wurden an einer Böschung im unmittelbaren Uferbereich durchgeführt. Über die



Fläche der schwimmenden Reflexionstargets von  $1 \times 1 \text{ m}^2$  sinkt hier der Seeboden von 45 cm auf 75 cm ab. Weiterhin wurden Strahlungs- und Gewässerparameter mit der oben beschriebenen Umwelt-Sensorik durchgeführt. Der Aufbau der Turmmessungen ist in Abbildung 29 dargestellt.

Luftbilder des Aufbaus und der Versuchsdurchführung sind in Abbildung 30 gezeigt. Es wurden an verschiedenen Orten manuelle Tiefenmessungen durchgeführt, was aufgrund des Uferbewuchses und des abfallenden Untergrundes aber nur eingeschränkt möglich war. Abbildung 30b zeigt außerdem Unterwasserbewuchs am abfallenden Seegrund, was eine Herausforderung für das Tiefenprofil-Retrieval darstellt.

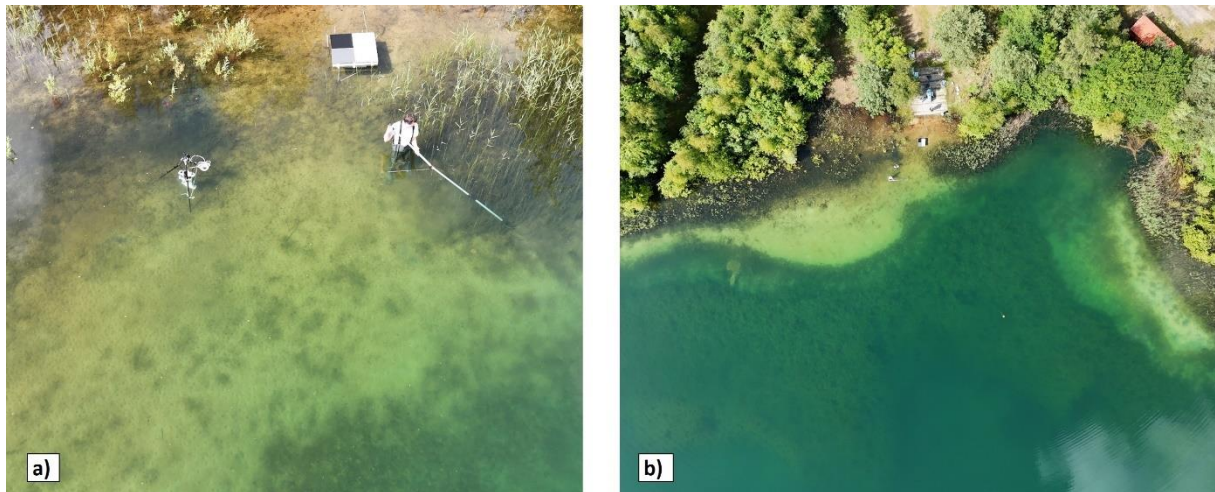


Abbildung 30: Luftbilder des Messaufbaus der Turmmessungen aus einigen Metern Höhe (a) und aus größerer Höhe (b).

Am Tag der Experimentdurchführung lagen exzellente Sichtbedingungen im See vor. Der Beam Attenuation Coefficient (Transmissionsmessungen mit dem TriOS Viper) ist etwa  $0.8 \text{ m}^{-1}$  bei 550 nm (siehe Abbildung 31 B). Dies entspricht einer Sichtweite von etwa 3.75 m, was den visuellen Eindruck (siehe Abbildung 31 A) bestätigt.

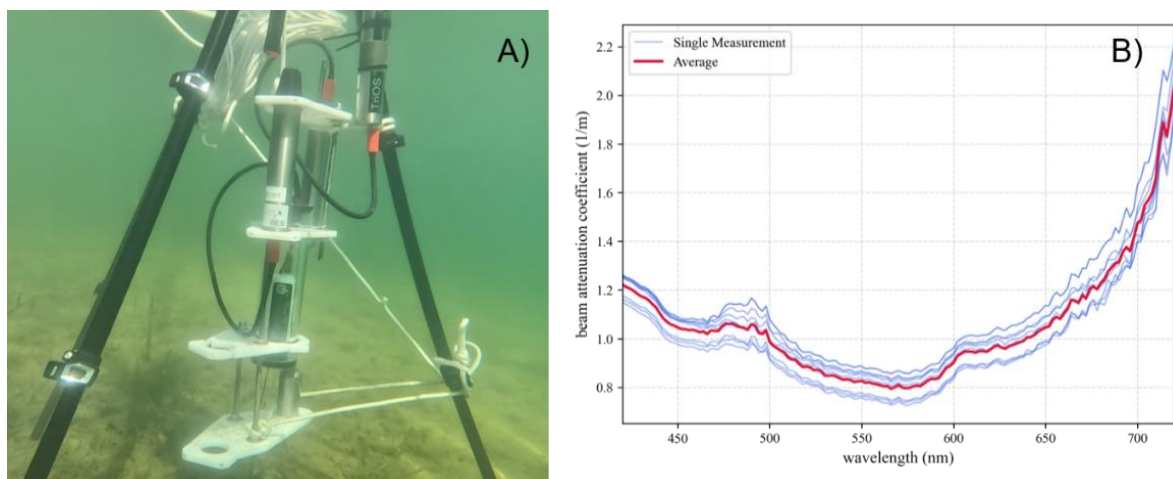


Abbildung 31: A) Unterwasser-Ansicht der stationären Umweltmessungen, B) Beam Attenuation Coefficient Spektrum des Baggersee-Wassers zum Zeitpunkt des Feldexperiments.

Das Wetter während der Turmmessungen war sonnig und wolkig im Mix. Dies spiegelt sich in den Schwankungen der Irrdianzmessungen in Abbildung 32 wieder, in der die Radiometermessungen unmittelbar über und unter der Wasseroberfläche dargestellt sind, sowie das vom Seeboden reflektierte aufsteigende Licht. Die spektrale Reflexion des Seebodens hat einen wesentlichen Einfluss

auf die Strahlungstransportrechnungen. Typische Werte liegen normalerweise tabellarisch vor und es muss eine Annahme über die Seegrundbeschaffenheit gemacht werden. Zum Zeitpunkt der hier gezeigten Messungen wurde mit der Multispektralkamera aus ca. 5 m Höhe aufgenommen, wie in Abbildung 29A dargestellt.

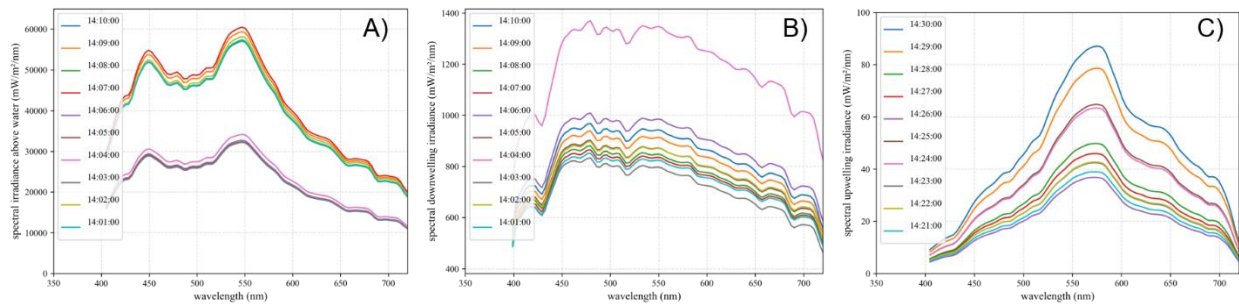


Abbildung 32: A) Einfallendes Sonnenspektrum unmittelbar über der Wasseroberfläche, B) Einfallendes Sonnenspektrum unmittelbar unter der Wasseroberfläche, C) Vom sandigen Seeboden reflektiertes Spektrum gemessen 50 cm über Grund.

Der See wurde großflächig mit dem Multibeam-Sonarsystem des AUVs vermessen. Die so aufgenommene Ground Truth der Bathymetrie zielte dabei weniger auf die Turmmessungen als vielmehr auf die Befliegung ab, da hier auch größere Gewässertiefen weiter draußen betrachtet wurden. Die Sonar-Messung wurde darüber hinaus mit einem Überwasser-Laserscan für ein Überwasser-Unterwasser-3D-Modell kombiniert (siehe Abbildung 33). Die Vermessung musste allerdings vorab durchgeführt werden. In der Folge sind daher weniger die Absolutwerte interessant als vielmehr der Verlauf des Seebodens. Die Bathymetrie, die aufgenommenen Radianzen und insbesondere die spektrale Reflexion des Seebodens, wurden den Verbundpartnern zugänglich gemacht.



Abbildung 33: Punktwolken-Darstellung der Baggersee-Vermessung mit dem Multibeam der Seekatze.

### Feldexperiment Ostsee (Befliegung in Kiel Friedrichsort):

Zusätzlich zu den Turmmessungen und der Befliegung am See wurde eine weitere Befliegung an der Ostsee in Kiel Friedrichsort durchgeführt. Prinzipiell kamen dieselben Instrumente zum Einsatz, einzig der Aufbau wich geringfügig von den Turmmessungen ab. So wurden die Reflexionstargets beispielsweise am Strand anstatt auf einer schwimmenden Plattform im Wasser installiert. Dies war problemlos möglich, da die schwimmende Installation während der Turmmessungen darauf abzielte, die Panels während einer längeren Zeitreihe bei schwankender Einstrahlung im Blickfeld der statisch

installierten Multispektralkamera zu halten, während die Drohne bei der Befliegung einfach über die Panels hinwegflog bevor der Meeresboden überflogen wurde.

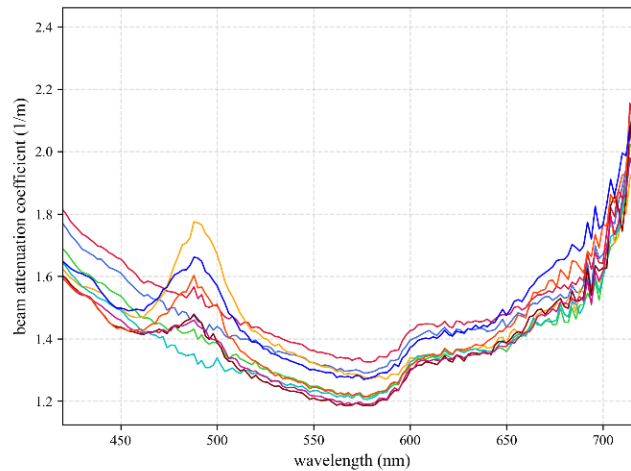


Abbildung 34: Gemessener Beam Attenuation Coefficient farblichodiert für verschiedene Tiefen (siehe auch Abbildung 5).

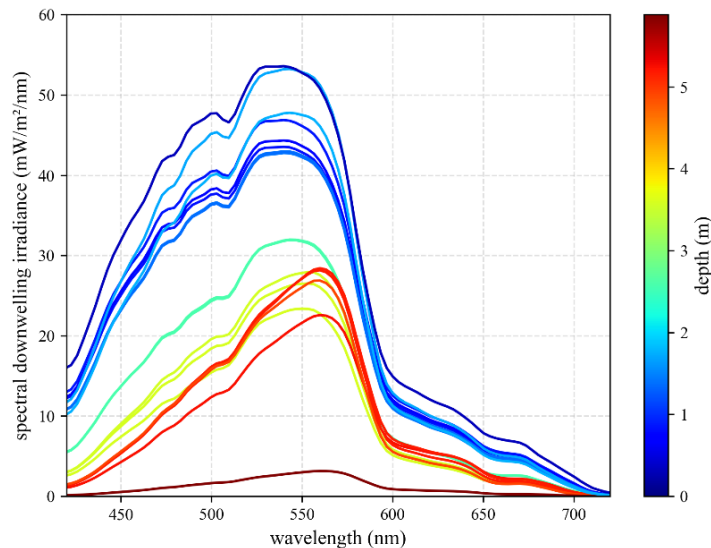


Abbildung 35: Einfallende Sonnenstrahlung in unterschiedlicher Tiefe.

Generell lagen gute Unterwasser-Sichtbedingungen während der Befliegung vor. Gleichzeitig aufgenommene Unterwasser-Transmissionsspektren (Abbildung 34) zeigen einen Beam attenuation coefficient von etwa  $1.2 \text{ m}^{-1}$  bei  $550 \text{ nm}$ , was einer Sichtweite von etwa  $2.3 \text{ m}$  entspricht. Farblich kodiert sind Messungen in unterschiedlichen Tiefen. In den Oberflächen-nahen Messungen ist ein Peak bei ca.  $480 \text{ nm}$  zu finden, der durch Chlorophyll-Absorptionen hervorgerufen wird. Dies weist auf hohe Phytoplankton-Konzentrationen nahe der Oberfläche hin. Diese Messungen wurden ebenfalls in Kapitel 2.1.1 (Abbildung 5) diskutiert. Ebenfalls als Funktion der Tiefe wurde die einfallende Sonnenstrahlung gemessen (Abbildung 35), die mit zunehmender Tiefe absinkt.



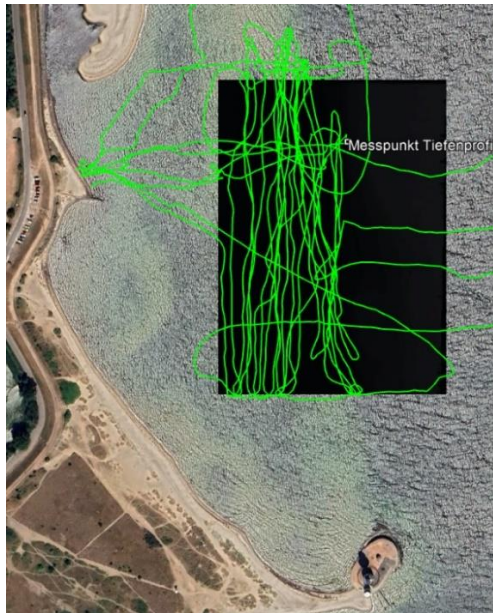


Abbildung 36: Track der begleitenden Schlauchboot-Fahrt in grün für die Umweltsensorik-Messungen. Das mit dem AUV vermessene Areal ist schwarz hinterlegt.

Die in Abbildung 34 und Abbildung 35 dargestellten Umweltmessungen wurden als Tiefenprofil an einem Punkt (Wassertiefe 6 m) während einer Erkundungsfahrt des Testgebiets mit einem Schlauchboot aufgenommen. Der Schlauchboot-Track mit schraffiertem Testgebiet und eingezeichneter Tiefenprofilmessung ist in Abbildung 36 dargestellt. Insgesamt war das Areal geprägt durch sandigen Boden sowie Wasserpflanzen. Entlang des Tracks wurden wiederholte Messungen der Absorption und der Einstrahlung vorgenommen, es wurden aber keine gravierenden Veränderungen festgestellt. Die gezeigten Umweltmessungen sind somit stellvertretend für das gesamte Testgebiet.

Das mit dem Multibeam-Sonar des AUV aufgenommene Tiefenprofil ist in Abbildung 37 dargestellt. Es wurde wiederum, zusammen mit den Umweltmessungen, als Ground Truth für die Validierung des multispektralen REMAP-Systems bereitgestellt.

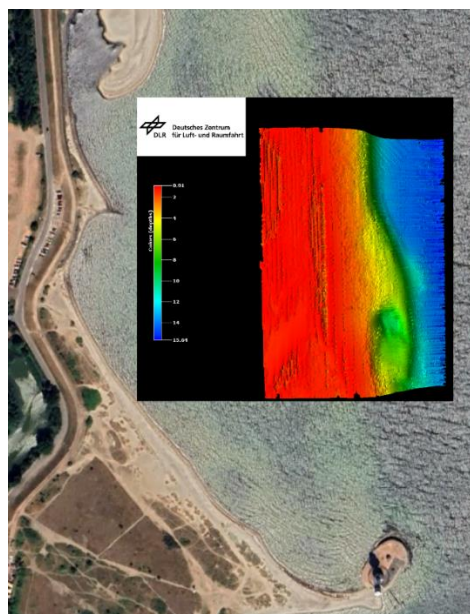


Abbildung 37: AUV Multibeam-Messung mit Tiefenskala.

### **Gegenüberstellung zu den vorgegebenen Zielen:**

Die hier gezeigte Ground Truth, speziell die mit Sonarsystemen des AUV (Seekatze) aufgenommene Bathymetrie des Seegrundes, lieferte in erster Linie Beiträge für das Verbundprojekt REMAP und weniger eigenständige wissenschaftliche Ergebnisse zum Teilprojekt „REMAP: experimental investigations“, wie sie die beiden oben dargestellten Themengebiete *PSF* und *Polarisation* lieferten. Dies war jedoch auch nicht beabsichtigt und ist in Einklang mit dem Projektziel. Es wurden insgesamt zwei Bathymetrien an zwei verschiedenen Orten (Turmmessungen und Befliegung an einem See und eine weitere Befliegung an der Ostsee) aufgenommen. Zusätzlich zur Bathymetrie bestand die Ground Truth aus Umweltmessungen, speziell der solaren Einstrahlung über und unter Wasser und der spektralen Absorptionen des Wassers, die darüber hinaus auch in den oben dargestellten Themengebieten *PSF* und *Polarisation* durchgeführt werden konnten. Das Projektziel im Themengebiet Ground Truth wurde damit erreicht.

#### 2.1.4 Konzeptarbeit zur Georeferenzierung und Mosaikierung

Für ein mögliches operatives drohnengestütztes Aufnahmesystem zur exakten Kartierung des Seegrundes sowie der flächenhaften bathymetrischen Messung der Seetiefe stellt sich naturgemäß die Aufgabe der Georeferenzierung der Daten. Bisherige Systeme (luft- oder satellitengestützt) setzen dabei üblicherweise auf eine direkte Georeferenzierung der Sensordaten durch GNSS/INS-Systeme, sowie gegebenenfalls einer nachgestellten Co-Referenzierung mit Sekundärdaten.

Ziel des Vorhabens REMAP war, neue Technologien zu entwickeln, die solche Datenprodukte drohnengestützt in erheblich höherer geometrischer Auflösung erzeugen können. Eine der dafür notwendigen Voraussetzungen ist, den Objektstand zwischen Sensor und Zielebene massiv zu verkleinern. Mit sinkender Flughöhe nimmt jedoch linear auch die Schwadbreite der Sensorik und die Flächenleistung eines solchen abbildenden Systems ab, was wiederum negative Auswirkungen auf die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit hat.

Um ein solches Aufnahmesystem daher möglichst wirtschaftlich betreiben zu können, muss man zwei Aspekte im Rahmen der Aufnahmeplanung und der tatsächlichen Befliegung optimieren:

##### 1. X-track Overlap

Um einen Küstenabschnitt luftgestützt mit einem photogrammetrischen/bathymetrischen Sensorsystem möglichst effizient zu kartieren, nutzt man einen küstenparallelen Streifenflug. Die einzelnen Flugstreifen überlappen sich dabei notwendigerweise um einen gewissen Anteil der Schwadbreite (x-track Overlap). Im Fall von Landoberflächen braucht man einen Overlap von etwa 40%-80%, um aus korrespondierenden Punkten im Überlappungsbereich die Georeferenzierung zu verbessern sowie eine Tiefeninformation abzuleiten. Für die Anwendung in REMAP sind diese beiden Punkte nicht relevant, jedoch muss in der Planung trotzdem ein gewisser Mindest-Overlap vorgesehen werden, da das Fluggerät nur mit begrenzter Genauigkeit fliegen kann und notwendige Flugmanöver zum Ausgleich von Wind etc. sonst leicht zum „Abriss“ eines geschlossenen Bildverbandes führen können (Abbildung 38).





Abbildung 38: Typischer Abriss eines Bildverbandes ("Loch") durch starke Flugbewegung und unzureichend geplante Querüberlappung (x-track Overlap).

## 2. Rohdateneignung / Störungen

Im Gegensatz zum Mapping von Landoberflächen ist die bloße Abbildung eines Areal der Wasseroberfläche in einem Bild keine hinreichende Voraussetzung für die mögliche Kartierung des darunterliegenden Seegrundes. Es gibt eine ganze Reihe von Faktoren, die für ein aufgenommenes Bild beeinflussen, ob sich daraus eine hinreichend gute Tiefeninformation, und Bodentextur bestimmen lässt. Beispielsweise führen unvermeidliche Sonnenreflektionen (Sunglint) dazu, dass Bilddaten in diesem Bereich nicht auswertbar sind. Ein weiterer Aspekt ist die lokale Neigung der Wasseroberfläche durch Wellen, die durch die unterschiedliche Lichtbrechung im Ergebnis zu einem stark verzerrten Bild des Seegrundes auf dem Sensor führen kann (siehe auch Arbeiten zur Polarisationsnutzung und die geplante Veröffentlichung in Vorbereitung Peters et al., Kapitel 2.6).

Im Rahmen einer vorausschauenden Flugplanung kann man den ersten Aspekt (x-track-overlap) zwar berücksichtigen, jedoch gibt es dabei einen starken Zielkonflikt zwischen der Sicherheit vollständige Datensätze aufzunehmen (= großer x-track Overlap) und einer möglichst effizienten und wirtschaftlichen Befliegung (= geringer x-track Overlap). Der Unterschied im Flugaufwand zwischen einer Befliegung mit 80% Overlap und 20% Overlap ist ein Faktor von vier (siehe Beispiel in Abbildung 39). Dies kann maßgeblich dafür sein, ob ein solcher Dienst wirtschaftlich angeboten werden kann oder nicht.

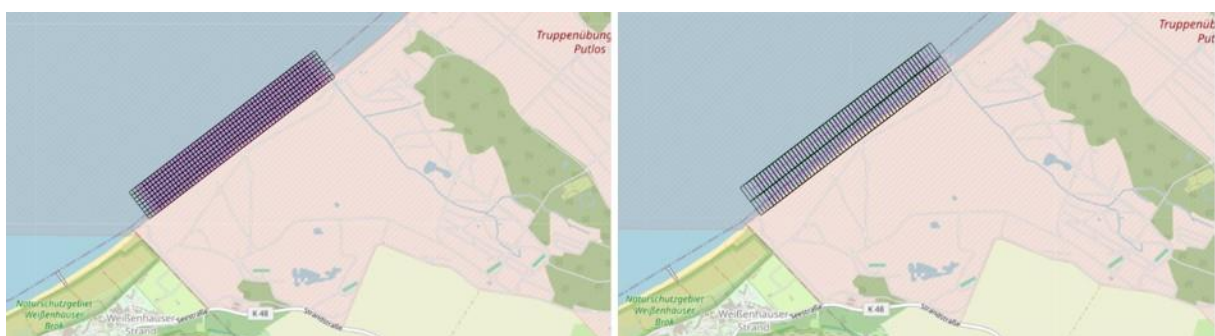


Abbildung 39: Bildflugplanung eines Flachwasserbereiches mit 80% x-track Overlap (links) und 20% x-track Overlap (rechts). Die Planungen umfassen jeweils das identische Gebiet; links sind dafür 8 Flugstreifen notwendig, rechts nur 2.

Den zweiten oben genannten Aspekt kann man in der Planung nur geringfügig berücksichtigen, beispielsweise durch geeignete Zeitfenster mit geringem Wellengang und eine reflexmindernde Hauptaufnahmerichtung. Die tatsächliche Nutzbarkeit der Daten lässt sich aber trotzdem erst nach der Aufnahme bewerten.

Im ungünstigsten Fall würde also nach einer Befliegung im Rahmen der Datenprozessierung festgestellt, dass der Datensatz an einigen Stellen nicht vollständig oder nicht hinreichend verarbeitbar wäre. Dies müsste dann mit einer aufwendigen späteren Wiederholung der Befliegung kompensiert werden. Deutlich wirtschaftlicher wäre es, wenn bereits während des Fluges eine Echtzeitvorverarbeitung der Bilddaten bewerten könnte, ob das überflogene Gebiet vollständig kartiert wurde, bzw. kartiert werden kann. Würden „Lücken“ oder andere Unzulänglichkeiten in den Daten detektiert, könnte man diese Bereiche dann noch während der Mission erneut aufnehmen und die Aufwände für eine zweite spätere Flugmission sparen. Eine solche Echtzeitanalyse würde deshalb auch die Planung einer besonders wirtschaftlichen Befliegungsmission mit nur geringem Overlap ermöglichen.

Eine solche hier skizzierte Echtzeit-Datenbewertung war das Ziel der Arbeiten zum Thema Mosaikierungskonzept innerhalb von REMAP. Für die Kartierung von Landoberflächen hat das DLR ein vergleichbares Verfahren bereits vor Jahren entwickelt (Berger2018) und setzt dieses in wissenschaftlichen wie auch operativen Kontexten ein. Dieses Verfahren basiert auf der Kenntnis der inneren und äußeren Abbildungsgeometrie der aufnehmenden Kamera, einer a-priori Kenntnis (Approximation) der zu mosaikierenden Oberfläche und einem sehr effizienten Verfahren zur Berechnung der minimalen projektiven Abbildung (siehe Abbildung 40).

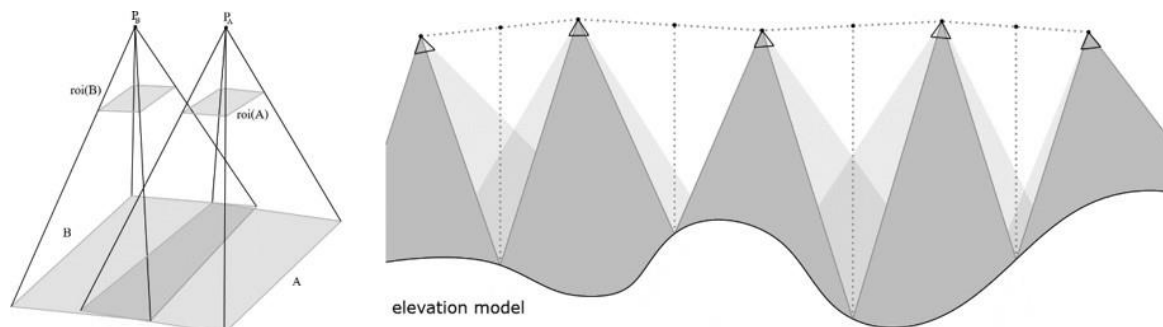


Abbildung 40: Prinzip der Bildmosaikierung nach dem TAC-Prinzip auf Basis der bekannten Abbildungsgeometrie und einer Approximation der Oberflächegeometrie.

Neben der bildhaften Mosaikierung des aufgenommenen Gebietes mit den Sensordaten ermöglicht das Verfahren auch die Bewertung der Vollständigkeit (Coverage-Analyse) und Qualität (Bodenauflösung) der Aufnahmen (Abbildung 41).

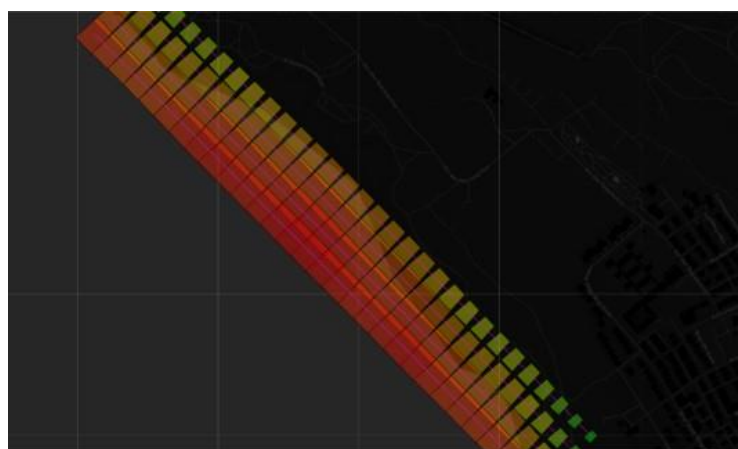


Abbildung 41: Analyse der geometrischen Abdeckung (Coverage) und der Datenqualität (farbkodiert) auf Basis der Aufnahmegeometrie.

Für REMAP war die Grundidee, dieses Verfahren so zu adaptieren, dass es sich auch für die drohnengestützte Kartierung von Wasserflächen anwenden lässt. Das Ziel ist dabei nicht, ein optimales Mosaik der Wasseroberfläche zu erzeugen, sondern ein Bildmosaik, welches die vollständige bathymetrische Auswertung der überflogenen Fläche ermöglicht und damit im Postprocessing eine lückenlose Abbildung des Seebodens, inklusive der Tiefeninformation.

Dazu wurde im Projektverlauf untersucht, welche zusätzlichen Parameter und Aufnahmebedingungen in ein solches Mosaikierungsverfahren einfließen müssen. Insbesondere sind hier der Sonnenstand (Azimuth und Elevation), sowie die Wellenrichtung zu nennen. Diese Parameter beeinflussen die Vorzugsrichtung der Einzelbildprojektion sowie die minimalen und maximalen Projektionswinkel. Hintergrund ist die notwendige Vermeidung von Sonnenreflexion (Sunlint) sowie die Berücksichtigung des sinnvollen Arbeitsbereiches der polarimetrischen Kamera (PolarSens) zur Bestimmung der Wasserflächennormale. Ersteres kann problemlos in Echtzeit berechnet/abgeschätzt werden, für letzteres wurden im Projekt Erfahrungswerte ermittelt. Es hat sich dabei aber herausgestellt, dass mit der derzeitigen Technologie zu lange Belichtungszeiten der PolarSens benötigt werden (siehe Kapitel 2.1.2).

Zusätzlich wurden im Projektverlauf zwei weitere Einflüsse offenbar, die dazu führten, dass ein Echtzeitmosaikierungskonzept schlussendlich nicht im gewünschten Maße entwickelt werden konnte:

#### 1. Diskontinuierliche Abbildung des Bodens:

Grundsätzlich führt die Brechung des Lichts an der Wasseroberfläche zu einer Verzerrung der Abbildung des Bodens im aufgenommenen Bild (Peters et al., in prep.). Für das Mosaikierungsverfahren muss die Verzerrung abgeschätzt und korrigiert werden. Dazu dient die Abschätzung der lokalen Neigung der Wasseroberfläche mit Hilfe der PolarSens-Kamera (Kapitel 2.1.2). Die Annahme im Projekt war, dass die Wellenoberfläche typischerweise (geringe Wellenhöhe) zwar die Abbildung des Bodens lokal stark verzerren kann, aber dennoch eine kontinuierliche Sicht auf den Boden ermöglicht. Die optischen Simulationen durch OptoPrecision haben diese Annahme widerlegt. Selbst bei moderaten Wellen auf der Wasseroberfläche ist die Abbildung des Bodens diskontinuierlich, d.h. Teile des Bodens unter der aufgenommenen Wasseroberfläche können allein aufgrund der durch die Brechung beeinflussten Abbildungsgeometrie nicht von der Kamera abgebildet werden. Damit fällt die Grundannahme, dass sich aus einem intelligent (und in Echtzeit) berechnetem Bildmosaik der Wasseroberfläche auch ein geschlossenes Mosaik des Gewässerbodens ableiten lässt.

#### 2. Unbekannte Projektionshöhe

Wie oben beschrieben ist für die Georeferenzierung und Mosaikierung die Kenntnis der Abbildungsgeometrie und eine a-priori Approximation der Projektionsoberfläche nötig. Letztere ist im für REMAP relevanten bathymetrischen Fall die Oberfläche der Gewässerbodens. Für eine Mosaikierung von Landoberflächen ist eine Unsicherheit in der Höhen-/Tiefenschätzung von wenigen Metern i.d.R. unproblematisch. Wie sich im Projektverlauf herausgestellt hat, gilt dies für den Gewässerboden nicht. Sobald die Projektionsrichtung oder die Oberflächennormale des Wassers deutlich von nadir ( $0^\circ$ ) abweicht, erzeugt die Unbekannte Länge der Lichtausbreitung zwischen Wasseroberfläche und Boden einen erheblichen und unbekanntem lateralen Versatz bei der Georeferenzierung. Die Annahme, dass die Abschätzung der lokalen Neigung der Wasseroberfläche für eine hinreichend exakte Projektion ausreichend ist, hat sich daher nicht bestätigt.

### **Gegenüberstellung zu den vorgegebenen Zielen:**

Die konzeptionelle Arbeit am Thema Georeferenzierung/Mosaikierung hat wichtige Erkenntnisse zu den Abhängigkeiten und Randbedingungen einer möglichst wirtschaftlichen drohngestützten Datenaufnahme geliefert. Das bestmöglich erhoffte Ergebnis, ein Konzept zur Echtzeit-Mosaikierung der Bilddaten des Seegrundes mit Vollständigkeits- / und Qualitätsanalyse auf Basis bestehender Technologien des DLR, hat sich jedoch nicht realisieren lassen. Dazu wäre ggf. mindestens zusätzliche Sensorik (z.B. LiDAR) im Aufnahmesystem notwendig.

## 2.2 Wichtigste Positionen des Zahlenmäßigen Nachweises

Die Sach- und Personalkosten erklären sich aus den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die zu oben beschriebenen (Kapitel 2.1) Ergebnissen führten.

Die größten Investitionsposten umfassen zwei Radiometer für den Über- und Unterwasserbereich, sowie eine PolarSens-Kamera.

Aufgrund der Covid19-Pandemie wurden Projekttreffen in der Regel online abgehalten und viele Veranstaltungen wie beispielsweise Konferenzbesuche vielen aus, insbesondere in der ersten Projekthälfte. Aufgrund dessen wurden weniger Reisemittel verbraucht als im Projektantrag veranschlagt.

Eine detaillierte Aufstellung ergibt sich aus dem Verwendungsnachweis.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Es wurden signifikante Ergebnisse und Fortschritte zu den in Kapitel 2.1 beschriebenen Themenfeldern erzielt. Die Ergebnisse waren einerseits für die gemeinsame Entwicklungsarbeit im Verbund wichtig, stellen gleichzeitig aber auch wichtige Erkenntnisse im jeweiligen wissenschaftlichen Feld dar.

Im Einzelnen konnten die umfangreichen Kalibrationsstudien mit der PolarSens-Kamera den Fehler der abgeleiteten Oberflächennormalen signifikant reduzieren, die Grundlagenexperimente halfen eine klare Empfehlung für den Einsatz bzw. die Limitierung der PolarSens abzugeben, und das Retrieval zur Bestimmung der lokalen Neigung der Wasseroberfläche wurde grundlegend demonstriert. Es wurden damit sowohl Mehrwerte und Zuarbeiten innerhalb des Projektes generiert, als auch wissenschaftliche Erkenntnisse, die in einer Publikation veröffentlicht werden.

Die Umweltmessungen und Ground Truth-Aufnahmen waren eine notwendige Voraussetzung zur Erprobung des im Verbund entwickelten Drohnen-getragenen Sensorsystems, d.h. Arbeiten in diesem Bereich stellten in erster Linie einen Mehrwert innerhalb des Verbundprojektes und in der Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern dar.

Die PSF-Untersuchungen lieferten einen umfangreichen, multispektralen Datensatz. Auf Basis dieser Datenlage konnten wertvolle Einsichten in den Einfluss der PSF unter verschiedensten Umweltbedingungen gewonnen werden. Für konkrete Bedingungen, die einem späteren Anwendungsszenario des REMAP-Systems ähneln, wurde der PSF-Einfluss eingehend betrachtet. Die Ergebnisse werden ebenfalls in einem wissenschaftlichen Journal veröffentlicht.

Diese Arbeiten wären ohne die finanzielle Unterstützung durch den Fördermittelgeber nicht möglich gewesen, da die Grundfinanzierung der DLR-Institute dafür nicht ausgereicht hätte. Zugleich wurden

Kontakte und Kooperationen zwischen Wissenschaft und Industrie auf- und ausgebaut, die mit größter Wahrscheinlichkeit zu weiteren gemeinsamen Vorhaben und Projekten führen werden.

Die detaillierte Verwendung der Mittel ist im Zahlungsnachweis aufgeführt.

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

### 2.4.1 Erreichung der Ziele im Verwertungsplan

Der bei Projektbeginn angestrebte Verwertungsplan umfasste drei wesentliche Punkte

1. Aufbau spezifischer Expertise
2. Wissenschaftliche Publikationen
3. Erschließung neuer Partner und Nutzernetzwerke

#### **Aufbau spezifischer Expertise**

Ein erklärtes Ziel des DLR-MI war der Aufbau spezifischer Expertise in der Messung und dem Verständnis der Lichtstreuung unter Wasser, speziell der Point Spread Function (PSF), welche die Verschmierung eines Punktes durch Streuprozesse im Wasser beschreibt. Das Verständnis von Streuprozessen unter Wasser und ihrem Einfluss auf abbildende optische Systeme ist signifikant für die vom DLR-MI betriebene Entwicklung von optischen Unterwassersystemen für Inspektions- und Überwachungszwecke, d.h. die hier aufgebaute spezifische Expertise findet Anwendung in anderen Gebieten und zukünftigen Projekten.

Für beide Institute, DLR-OS und DLR-MI, ist auch die aufgebaute spezifische Expertise in der Untersuchung von und Arbeit mit neuartigen polarimetrisch messenden Sensoren relevant. Neben der in REMAP beschriebenen Anwendung ermöglicht der Einsatz polarisierter Strahlung auch eine Sichtverbesserung in streuenden Umgebungen in Überwasseranwendungen. In diesem Bereich fand die aufgebaute Expertise bereits Anwendung und half bei Untersuchungen und der Entwicklung eines Gerätes zur Sichtverbesserung bei Nebel und Rauch, d.h. Überwasser (Peters2023).

#### **Wissenschaftliche Publikationen**

Siehe Nr. 2.6

#### **Erschließung neuer Partner und Nutzernetzwerke**

Im Zuge der wissenschaftlichen Arbeiten wurden Kontakte auch über das Konsortium hinaus erschlossen und stimuliert. Insbesondere die Forschungsarbeiten zur polarisierten Strahlung führten zu Kontakten mit anderen Forschungseinrichtungen, einem intensiven wissenschaftlichen Austausch und einer gemeinsamen Publikation, die sich aktuell in Vorbereitung befindet.

Die Arbeiten zur Point Spread Function wurden im Rahmen einer Doktorarbeit durchgeführt, d.h. hier wurden universitäre Kontakte aufgebaut. Ebenfalls gipfeln die PSF-Arbeiten in einer gemeinsamen Publikation.

Darüber hinaus wurden Kontakte zu behördlichen Nutzern aufgebaut und gefestigt, die zu anderen gemeinsamen Projektanträgen geführt haben sowie zu weiteren, mit REMAP nicht verwandten Aktivitäten wie Teilnahmen an Feldexperimenten auf See.

#### **Fazit:**

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die zu Projektbeginn anvisierten Ziele des Verwertungsplans erreicht wurden bzw. sich derzeit in der Umsetzung befinden (Publikationen in Vorbereitung).

#### 2.4.2 Fortschreibung und Ausblick

Relativ große Forschungsanteile ergaben sich in der Arbeit mit polarisierter Strahlung zur Ableitung der lokalen Neigung der Wasseroberfläche. Es wurden mehr Messungen durchgeführt, Schlussfolgerungen gezogen und Erkenntnisse und Ergebnisse produziert, als in die entsprechende Publikation zu diesem Thema einfließen. Es ist daher abzusehen, dass weitere Publikationen und Konferenzteilnahmen folgen werden (unter dem Vorbehalt der Finanzierungsmöglichkeiten).

Als Ausblick erscheint es sinnvoll, größere PolarSens-Kameras oder Kamerasysteme im Infrarotbereich für das Retrieval der lokalen Neigung der Wasseroberfläche zu erforschen. Die in REMAP verfügbaren PolarSens-Kameras arbeiteten im sichtbaren Spektralbereich und mussten mit spektralen Langpassfiltern betrieben werden, um den Strahlungsanteil aus dem Wasser zu minimieren. D.h. sie wurden in einem Bereich betrieben, bei dem herkömmliche Kameras auf Silizium-Basis eine sehr geringe Quanteneffizienz besitzen. In der Folge waren sehr lange Belichtungszeiten von einigen Sekunden notwendig, und die Messergebnisse verrauscht, was eine zusätzliche Mittelung über viele Bilder notwendig machte (siehe Kapitel 2.1 und Peters et al., in prep.). In der Folge war man auf glatte Wasseroberflächen und Messungen von unbewegten Plattformen aus beschränkt. Bei Wellengang und von bewegten Plattformen aus sind aber sehr viel kürzere Belichtungszeiten notwendig, da Bewegungsunschärfe und verschmierte Wellen ansonsten die Folge sind. Spezialkameras für den Infrarotbereich weisen eine höhere Quanteneffizienz für lange Wellenlängen auf, und könnten diese Einschränkung (glatte Wasseroberfläche, unbewegte Plattform) überwinden. Eine solche PolarSens-Kamera ist aktuell aber nicht im Markt verfügbar und es müsste daher ein Mehrkanal-System (d.h. mehrere kombinierte Kameras) aufgebaut werden. Alternativ sind mittlerweile PolarSens-Kameras im sichtbaren Spektralbereich mit höherer Auflösung verfügbar (siehe 2.5), die ebenfalls das Problem der starken Mittelungen reduzieren könnten. Wenn dies gelänge, könnte wie anvisiert die PolarSens mitsamt der in REMAP entwickelten Methode zur Berechnung der lokalen Neigung der Wasseroberfläche im operationellen Betrieb eingesetzt werden.

#### 2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Auf dem Gebiet der PolarSens-Kamera-Technologie gab es während des Projektzeitraums einen erheblichen Fortschritt hinsichtlich der verfügbaren Kamera-Auflösung. Wurden die REMAP-Messungen mit einer 5 MP-Kamera gemacht, so ist inzwischen eine 12 MP-Kamera verfügbar. Dies würde eine größere Auflösung auf der Wasseroberfläche erlauben oder alternativ das Mitteln über mehrere Pixel und damit eine Rauschreduktion gestatten. Dies ist wichtig, da ein wesentliches Ergebnis der Polarisationsstudien war, dass zu lange Belichtungszeiten und das Mitteln über mehrere Bilder zur Rauschverminderung notwendig waren. Die Verfügbarkeit besserer Kameratechnologie könnte diese Hürde überwinden.

#### 2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Es befinden sich derzeit zwei wissenschaftliche Publikationen in Vorbereitung:



- In Peters et al. (in prep.) werden die wesentlichen Ergebnisse der Polarisationsstudien präsentiert. Hauptschwerpunkte sind die Kalibration der PolarSens-Kamera, das Retrieval von Oberflächennormalen und die Korrektur der Brechung beim Blick durch die Oberfläche.
- In Schmidt et al., (in prep.) werden die Ergebnisse der PSF-Messungen präsentiert. Neben den Messergebnissen liegt der Schwerpunkt auf der Entfaltung verschmierter Unterwasseraufnahmen bei unterschiedlichen Trübungen.

### 3. Liste der verwendeten Abkürzungen

REMAP	Rapid Environmental Monitoring via Airborne optical Platforms
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
(DLR-) MI	DLR-Institut für den Schutz Maritimer Infrastrukturen
(DLR-) OS	DLR-Institut für Optische Sensorsysteme
ROV	Remote Operated Vehicle
AUV	Autonomes Unterwasserfahrzeug (autonomous underwater vehicle)
BAC	Beam Attenuation Coefficient
PolarSens	Polarisations-sensitive Kamera (zur Vermessung des Polarisationsgrads und der Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts)
DoLP	Degree of linear Polarisation
AoLP	Angle of linear Polarisation
PSF	Point Spread Function
TES	Arbeitsgruppe „Technologieerprobung“ des DLR-MI
SEN	Arbeitsgruppe „Sensorik“ des DLR-MI
SWIR	Short-wave Infrarot
LED	Leuchtdiode
SDK	Software Development Kit

### 4. Literaturverzeichnis

Peters (in prep.) Enno Peters, Gary A. Atkinson, and Maurice Stephan, "Correcting the view through the water surface by recovery of surface normal orientations using polarization imaging", in Vorbereitung

Schmidt (in prep.) Jendrik Schmidt, Enno Peters, Maurice Stephan and Oliver Zielinski, "Point Spread Function Measurements for Underwater Imaging: An Analysis of Wavelength-specific behaviour for image deconvolution", in Vorbereitung

Schmidt2022 J. Schmidt, E. Peters, M. Stephan and O. Zielinski, "Feasibility study on LED-based underwater gated-viewing for inspection tasks," OCEANS 2022, Hampton Roads, Hampton Roads, VA, USA, 2022, pp. 1-8, doi: 10.1109/OCEANS47191.2022.9977303

Mischung 2022 M. Mischung, J. Schmidt, E. Peters, M. Berger, M. Anders, and M. Stephan "Development and characterisation of a portable, active short-wave infrared camera system for vision enhancement through smoke and fog", Proc. SPIE 12271, Electro-optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIX, 122710M (2 November 2022)

Peters2023 Enno Peters, Max Anders, Tristan Preis, Laura Kontschak, Jendrik Schmidt, and Maurice Stephan "Performance studies of two active SWIR instrument designs for vision enhancement in indoor applications", Proc. SPIE 12737, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XX, 127370Z (23 October 2023)

Laan2023 J. D. van der Laan, B. J. Redman, J. W. Segal, et al., "Increased range and contrast in fog with circularly polarized imaging," Appl. Opt. 62, 2577–2586 (2023)

Nowak 2015 A. Nowak, J. Ernst, and F. Günther, "Inline residual stress measurement in glass production," Glass Worldw. 58, 72–73 (2015)

- Atkinson2006 G. Atkinson and E. Hancock, "Recovery of surface orientation from diffuse polarization," *IEEE Trans. on Image Process.* 15, 1653–1664 (2006)
- Atkinson2018 G. A. Atkinson and J. D. Ernst, "High-sensitivity analysis of polarization by surface reflection," *Mach. Vis. Appl.* 29, 1171–1189 (2018)
- Wolff1992 L. Wolff, "Diffuse reflection (intensity reflectance model)," in *Proceedings 1992 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, (1992), pp. 472–478
- Wolff1994 L. B. Wolff, "Diffuse-reflectance model for smooth dielectric surfaces," *J. Opt. Soc. Am. A* 11, 2956–2968 (1994)
- Kattawar1989 G. W. Kattawar and C. N. Adams, "Stokes vector calculations of the submarine light field in an atmosphere-ocean with scattering according to a rayleigh phase matrix: Effect of interface refractive index on radiance and polarization," *Limnol. Oceanogr.* 34, 1453–1472 (1989)
- Wolff1991 L. Wolff and T. Boulton, "Constraining object features using a polarization reflectance model," *IEEE Trans. on Pattern Anal. Mach. Intell.* 13, 635–657 (1991).
- Zappa2008 C. J. Zappa, M. L. Banner, H. Schultz, et al., "Retrieval of short ocean wave slope using polarimetric imaging," *Meas. Sci. Technol.* 19, 055503 (2008)
- Pezzaniti2009 J. L. Pezzaniti, D. Chenault, M. Roche, et al., "Wave slope measurement using imaging polarimetry," in *Ocean Sensing and Monitoring*, vol. 7317 W. W. Hou, ed., International Society for Optics and Photonics (SPIE, 2009), p. 73170B
- Baxter2008 B. Baxter, B. A. Hooper, J. Z. Williams, and J. P. Dugan, "Polarimetric remote sensing of ocean waves," in *2009 Oceans*, (2009), pp. 1–5
- Hooper2015 B. A. Hooper, B. V. Pelt, J. Z. Williams, et al., "Airborne spectral polarimeter for ocean wave research," *J. Atmospheric Ocean. Technol.* 32, 805 – 815 (2015).
- Barsic2012 P. H. Barsic and C. R. Chinn, "Sea surface slope recovery through passive polarimetric imaging," in *2012 Oceans*, (2012), pp. 1–9
- Gilerson2020 A. Gilerson, C. Carrizo, A. Ibrahim, et al., "Hyperspectral polarimetric imaging of the water surface and retrieval of water optical parameters from multi-angular polarimetric data," *Appl. Opt.* 59, C8–C20 (2020)
- Lu2018 X. Lu, J. Yang, W. Jin, et al., "Polarization properties of reflected light with natural light incidence and elimination of angle of incidence ambiguity," *Appl. Opt.* 57, 8549–8556 (2018)
- Liu2018 J. Liu, X. Lu, W. Jin, et al., "Transparent surface orientation from polarization imaging using vector operation," *Appl. Opt.* 57, 2306–2313 (2018)
- Li2023 X. Li, Z. Liu, Y. Cai, et al., "Polarization 3d imaging technology: a review," *Front. Phys.* 11 (2023)
- Chipman2016 R. Chipman, G. Young, and W. Lam, *Polarized Light and Optical Systems*, Optical Sciences and Applications of Light (Taylor & Francis, 2016)
- Powell2013 S. B. Powell and V. Gruev, "Calibration methods for division-of-focal-plane polarimeters," *Opt. Express* 21, 21039–21055 (2013)
- Lane2022 C. Lane, D. Rode, and T. Rösger, "Calibration of a polarization image sensor and investigation of influencing factors," *Appl. Opt.* 61, C37–C45 (2022)
- Laux2002 A. Laux; R. Billmers; L. Mullen; B. Concannon; J. Davis; J. Prentice; V. Contario (2002): The a, b, c s of oceanographic lidar predictions: a significant step toward closing the loop between theory and experiment. In: *Journal of Modern Optics* 49 (3-4), S. 439–451. DOI: 10.1080/09500340110088498.
- Ahrenberg1998 Ahrenberg, Frank; Harsdorf, Stefan; Niehues, Joerg; Reuter, Rainer: Contrast enhanced imaging in the sea: Application of the optical transfer function for image reconstruction. In: *EARSel Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea*, S. 66–74.
- Barth1997 Barth, Hans; Grisard, Klaus; Holtsch, Kurt; Reuter, Rainer; Stute, Uwe (1997): Polychromatic transmissometer for in situ measurements of suspended particles and gelbstoff in water. In: *Appl. Opt.* 36 (30), S. 7919–7928. DOI: 10.1364/AO.36.007919.
- Dolin2006 Dolin, L.; Gilbert, G.; Levin, I.; Luchinin, A. (2006): Theory of imaging through wavy sea surface. In: *Inst. Appl. Phys. (RAS)*.
- Johnsen2016 Geir Johnsen; Martin Ludvigsen; Asgeir Sørensen; Lars Martin Sandvik Aas (2016): The use of underwater hyperspectral imaging deployed on remotely operated vehicles - methods

- and applications. In: *IFAC-PapersOnLine* 49 (23), S. 476–481. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.10.451.
- Oubei2018 Hassan M. Oubei; Chao Shen; Abba Kammoun; Emna Zedini; Ki-Hong Park; Xiaobin Sun et al. (2018): Light based underwater wireless communications. In: *Japanese Journal of Applied Physics* 57 (8S2), 08PA06. DOI: 10.7567/JJAP.57.08PA06.
- Jerlov1968 Jerlov, N. G. (1968): *Optical Oceanography*: Elsevier (Oceanography Series, 5).
- Watson2013 John Watson; Oliver Zielinski (Hg.) (2013): *Subsea Optics and Imaging*: Woodhead Publishing (Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials).
- Voss1990 Kenneth J. Voss; Albert L. Chapin (1990): Measurement of the point spread function in the ocean. In: *Appl. Opt.* 29 (25), S. 3638–3642. DOI: 10.1364/AO.29.003638.
- Voss1991 Voss, Kenneth J. (1991): Simple empirical model of the oceanic point spread function. In: *Appl. Opt.* 30 (18), S. 2647–2651. DOI: 10.1364/AO.30.002647.
- Bohan2020 Liu, Bohan; Liu, Zhaojun; Men, Shaojie; Li, Yongfu; Ding, Zhongjun; He, Jiahao; Zhao, Zhigang (2020): Underwater Hyperspectral Imaging Technology and Its Applications for Detecting and Mapping the Seafloor: A Review. In: *Sensors* 20 (17). DOI: 10.3390/s20174962.
- Maccarone2015 Maccarone, Aurora; McCarthy, Aongus; Ren, Ximing; Warburton, Ryan E.; Wallace, Andy M.; Moffat, James et al. (2015): Underwater depth imaging using time-correlated single-photon counting. In: *Optics express* 23 (26), S. 33911–33926. DOI: 10.1364/OE.23.033911.
- McLean1991 McLean, John W.; Voss, Kenneth J. (1991): Point spread function in ocean water: comparison between theory and experiment. In: *Appl. Opt.* 30 (15), S. 2027–2030. DOI: 10.1364/AO.30.002027.
- Mertens1977 Mertens, L. E.; Replogle, F. S. (1977): Use of point spread and beam spread functions for analysis of imaging systems in water. In: *J. Opt. Soc. Am.* 67 (8), S. 1105–1117. DOI: 10.1364/JOSA.67.001105.
- Duntley1963 Seibert Qu. Duntley (1963): Light in the Sea. In: *Journal of the Optical Society of America* 53, S. 214–233.
- Duntley1971 Seibert Qu. Duntley (1971): Underwater Lighting by Submerged Lasers and Incandescent Sources. In: *Scripps Institution of Oceanography*.
- Solonenko2015 Solonenko, Michael G.; Mobley, Curtis D. (2015): Inherent optical properties of Jerlov water types. In: *Appl. Opt.* 54 (17), S. 5392–5401. DOI: 10.1364/AO.54.005392.
- Petzold1972 Theodore J. Petzold (1972): *Volume Scattering Functions for Selected Ocean Waters*. UC San Diego: Scripps Institution of Oceanography.
- Hou2008 Weilin Hou; Deric J. Gray; Alan D. Weidemann; Robert A. Arnone (2008): Comparison and validation of point spread models for imaging in natural waters. In: *Opt. Express* 16 (13), S. 9958–9965. DOI: 10.1364/OE.16.009958.
- Berger2018 Daniel Hein, Ralf Berger: “Terrain aware image clipping for real-time aerial mapping”, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume IV-1, 2018.