

Universität Augsburg

Fakultät für Angewandte Informatik

Institut für Geographie



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.

**Spektrale Datenbank für den Untergrund der Ostsee
sowie Einfluss auf die Bestimmung der Wassertiefe**

Masterarbeit in Klima- und Umweltwissenschaften

Leitung DLR: Dr. Peter Gege

Leitung Universität Augsburg: Prof. Dr. Karl-Friedrich Wetzel

Schnalzger, Kerstin

1235115

M. Sc. Klima- und Umweltwissenschaften, 5. Semester

kerstinschnalzger@outlook.com

Abgabetermin: 24.02.2016

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
Danksagung	VII
1 Einleitung und Ziel der Arbeit	1
2 Radiometrische Größen der optischen Fernerkundung.....	3
3 Die optischen Eigenschaften von Gewässern	4
3.1 Scheinbare optische Eigenschaften.....	4
3.2 Inhärente optische Eigenschaften	5
3.3 Optische Eigenschaften von Wasser und Wasserinhaltsstoffen.....	6
3.3.1 Chlorophyll-a	8
3.3.2 Schwebstoff (TSM)	9
3.3.3 Gelbstoff (CDOM).....	9
4 Water Colour Simulator – WASI	11
5 Material und Methoden	15
5.1 Beschreibung des Untersuchungsgebiets.....	15
5.2 Messstellen.....	17
5.3 Messgeräte und Messmethoden	19
5.3.1 Messung der Sichttiefe mit der Secchi-Scheibe.....	19
5.3.2 Messung der Wassertiefe mit dem Echolot am Schiff.....	19
5.3.3 Entnahme von Bodenproben mit dem Bodengreifer nach Ekman-Birge	20
5.3.4 Ibsen – Spektrometer	20
5.3.5 Spektrale Vermessung der Bodenproben	22
5.3.6 Ramses-System und Messungen	23
5.3.7 ASD FieldSpec Pro ® und Versuchsaufbau.....	24
5.3.8 Entnahme von Wasserproben.....	26
5.4 Datenverarbeitung	26
5.4.1 Ibsen-Daten	26
5.4.2 Ramses – Daten.....	28
5.4.3 Korrektur und der Reflexionsspektren der Bodenproben.....	29
5.4.4 Klassifizierung der Reflexionsspektren	30
5.4.5 Aufbereitung des mittleren Reflexionsspektrums der einzelnen Klassen für die Implementierung in WASI	30
5.5 Ableitung der Wassertiefe mit WASI	32

5.5.1	Ableitung der Wassertiefe aus simulierten Reflexionsspektren	32
5.5.2	Ableitung der Wassertiefen anhand ausgewählter Messungen	33
5.5.3	Ableitung der Wassertiefe aus in-situ Unterwasserreflexionsspektren	34
6	Ergebnisse	35
6.1	Spektrale Datenbank für den Untergrund der Ostsee.....	35
6.1.1	Gewöhnliches Seegras (<i>Zostera marina</i>).....	36
6.1.2	Stacheltang (<i>Desmarestia aculeata</i>)	38
6.1.3	Blutroter Seeampfer (<i>Delessaria sanguinea</i>)	39
6.1.4	Gemeine Miesmuschel (<i>Mytilus edulis</i>)	40
6.1.5	Sand	41
6.1.6	Schlick	43
6.1.7	Ton.....	45
6.2	Vergleich von in-situ Ergebnissen mit Reflexionsspektren aus dem Labor	46
6.3	Ergebnisse der Wasserprobenuntersuchung.....	47
6.3.1	Schwebstoff und Chlorophyll a	47
6.3.2	Gelbstoff (CDOM).....	48
6.4	Ableitung der Wassertiefe aus simulierten Daten mit bekanntem Untergrund .	49
6.5	Ableitung der Wassertiefe aus ausgewählten in-situ Daten.....	52
6.6	Ableitung der Wassertiefe aller Messungen (Validierung)	58
7	Diskussion.....	60
7.1	Qualität und Bedeutung der spektralen Datenbank	60
7.2	Einfluss der Bodenreflexion auf die Bestimmung der Wassertiefe	60
7.3	Ableitung der Wassertiefen aus in-situ Daten der Messkampagne	61
8	Zusammenfassung.....	63
	Literaturverzeichnis	65

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema eines Messinstruments zur Messung der Strahldichte L	3
Abbildung 2: Absorption und Rückstreuung von reinem Wasser.....	7
Abbildung 3: spezifischer Absorptionskoeffizient einer gewichteten Summe verschiedener Phytoplanktonarten	9
Abbildung 4: Messstationen der Schiffskampagne	17
Abbildung 5: Messung der Sichttiefe mit der Secchi-Scheibe	19
Abbildung 6: Entnahme von Bodenproben mit dem Ekman-Birge-Greifer	20
Abbildung 7: Ibsen-Spektrometer-System	21
Abbildung 8: Messung mit dem Ibsen-Spektrometer	22
Abbildung 9: Ramses – System	23
Abbildung 10: Versuchsaufbau im Spektroskopie-Labor.....	25
Abbildung 11: Gesättigte Sedimentproben zur spektralen Vermessung im Labor	25
Abbildung 12: Reflexion des Spectralons	28
Abbildung 13: Korrektur von Anomalien der Einzelmessungen.....	29
Abbildung 14: Erste Ableitung unterschiedlicher Gauß-Filter	31
Abbildung 15: Vergleich der Extremwerte des ungeglätteten und des geglätteten Spektrums	31
Abbildung 16: Vergleich der Remote Sensing Reflectance Über- und Unterwasser.....	34
Abbildung 17: Reflexionsspektren für die Datenbank für die Untergründe der Ostsee	35
Abbildung 18: Gewöhnliches Seegras (<i>Zostera marina</i>) Unterwasser und an Bord	36
Abbildung 19: <i>Zostera marina</i> : 124 Einzelmessungen (normiert auf 680).....	36
Abbildung 20: Spektren der <i>Zostera marina</i> -1 (links) und <i>Zostera marina</i> -2 (rechts).....	37
Abbildung 21: Stacheltang (<i>Desmarestia aculeata</i>)	38
Abbildung 22: Spektren der <i>Desmarestia aculeata</i> (links), normiert auf 680 nm (rechts)	38
Abbildung 23: Blutroter Seeampfer (<i>Delessaria sanguinea</i>)	39
Abbildung 24: Spektren der <i>Delessaria sanguinea</i>	39
Abbildung 25: Gemeine Miessmuschel (<i>Mytilus edulis</i>).....	40
Abbildung 26: Spektren der <i>Mytilus edulis</i> -1 (links) und <i>Mytilus edulis</i> -2 (rechts)	41
Abbildung 27: Sand-1 (links), Sand-2 (rechts)	42
Abbildung 28: Spektren Sand-1 (links), Sand-2 (rechts), unten normiert auf 680 nm	42

Abbildung 29: Schlick der Station ST1 (links) (mit hellem und dunklem Anteil), Schlick der Station T402 (rechts) (nur heller Anteil)	43
Abbildung 30: Spektren Schlick-hell (links) und Schlick-dunkel(rechts), unten normiert auf 680 nm.....	44
Abbildung 31: Ton	45
Abbildung 32: Spektren des Tons (links), interpoliert auf 680 nm (rechts)	45
Abbildung 33: Vergleich von Reflexionsmessungen im Feld (Ibsen) mit und im Labor (ASD).....	46
Abbildung 34: Gelbstoffabsorption von 20 Wasserproben.....	48
Abbildung 35: Vergleich der simulierten mit den abgeleiteten Wassertiefen (Bedeckung 100%)	49
Abbildung 36: Absolute Differenz zwischen simuliertem und abgeleitetem relativen Anteil des Bodentyps.....	51
Abbildung 37: Unterwasserfoto der Station T2-05_2	52
Abbildung 38: Fit-Ergebnisspektren T2-05_2.....	53
Abbildung 39: Unterwasserfoto der Station T4-04	55
Abbildung 40: Fit-Ergebnisspektren T4-04.....	55
Abbildung 41: Unterwasserfoto der Station T4-06	56
Abbildung 42: Fit-Ergebnisspektren T4-04.....	57
Abbildung 43: Wassertiefe gemessen und abgeleitet	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Symbolerklärung der Parameter in WASI	11
Tabelle 2: Übersicht über die Messstellen	18
Tabelle 3: Daten-Sets der simulierten Spektren	32
Tabelle 4: Startwerte und Grenzen für die Inversion.....	33
Tabelle 5: Ergebnisse der Wasserinhaltsstoffe (Wasserprobenuntersuchung HZG)	47
Tabelle 6: Werte der Gelbstoffabsorption	48
Tabelle 7: Genauigkeit der Inversion	50
Tabelle 8: Fit-Ergebnisse der Station T2_05_2 für Wassertiefe und Bedeckungsgrade ..	54
Tabelle 9: Fit-Ergebnisse der Station T4-04	56
Tabelle 10: Fit-Ergebnis der Station T4-06	57

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich in der Zeit des Schreibens dieser Arbeit auf unterschiedliche Art und Weise unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Dr. Peter Gege, der mich mit unglaublicher Geduld bei all meinen Problemen unterstützt hat und bei dem ich überaus viel Neues lernen konnte. Danke für die aufbauenden Worte, die tolle Zeit im DLR und an der Ostsee.

Bei Prof. Dr. Karl-Friedrich Wetzel möchte ich mich ebenfalls für die Betreuung, die aufmunternden Worte und für das großzügige Entgegenkommen bedanken.

Danke Mama, Papa und Linda, dass ihr euch immer um mich sorgt und immer an mich glaubt.

Danke Daniel, dass du auf deine Computerspiele verzichtet hast, als ich Masterarbeit geschrieben habe. Das hat mir wirklich sehr geholfen. Und: Danke das du da bist.

1 Einleitung und Ziel der Arbeit

Die Bathymetrie der Meere oder der Küstengewässer wird mittels Tiefenmessungen über ein Echolot an einem Schiff an Punkten oder entlang von Transsektten gemessen. Diese Methode schränkt eine flächendeckende Messung der Wassertiefe insofern ein, dass sie zum einen sehr teuer und aufwändig ist und zum anderen die Wassertiefenmessung aufgrund des Tiefgangs von Schiffen in sehr flachen Gewässern nicht durchgeführt werden kann. Das führt dazu, dass die Tiefenkarten in Flachwasserzonen sehr ungenau sind. Für einige Anwendungen ist die Wassertiefe in solchen Gebieten jedoch von sehr großer Bedeutung. Beispielsweise benötigt die Bundeswehr Informationen über die Tiefe solcher Zonen für Schiffsanlandungsoperationen und Angaben über die Klassifizierung des Untergrunds für die Minensuche und Tauchoperationen. Dafür sind oft Karten mit einer Auflösung von 1 bis 10 Metern mit einer zeitlichen Auflösung von etwa einem Tag erforderlich.

Über passive optische Fernerkundungsmethoden von Gewässern können Informationen flächendeckend, zeitlich hoch aufgelöst und kostengünstiger bereitgestellt werden. Die Grundlage dafür ist die Sonne. Die einfallende Sonnenstrahlung breitet sich im Wasser aus und wird auf ihrem Weg zunehmend durch das Wasser selbst sowie seine Inhaltsstoffe absorbiert und gestreut. Je nach Zusammensetzung des Wassers und der Tiefe wird ein entsprechender Anteil zurückgestreut und kann mittels Spektrometern detektiert werden. Die Bestimmung der Wassertiefe oder der Bathymetrie über optische Messungen beruht auf einem physikalischen Grundsatz, bei dem die Gesamtmenge der Strahlungsenergie, welche von einer Wassersäule reflektiert wird, eine Funktion der Wassertiefe darstellt. Dabei wird die Fähigkeit der kurzweligen Strahlung im grünen und blauen Spektralbereich genutzt, tief in eine Wassersäule einzudringen (Gao, 2009). In flachen Gewässern wird das Signal dabei auch um die spezifische Reflexion der dort vorhandenen Untergründe ergänzt.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und das Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB) wurden vom Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBW) beauftragt, das Potential von Hyperspektraldaten zu untersuchen, welche durch das Satellitensystem EnMap (Environmental Mapping and Analysis Program), nach voraussichtlichem Start im Jahr 2018, operationell verfügbar sein werden. Ziel des gesamten Projektes (Projekt CoastMap) ist dabei, die Bathymetrie sowie die Bodenbedeckung aus diesen Daten abzuleiten. Dabei sollen über halbautomatische Verfahren Informationen über die Topographie in Flachwasserbereichen sowie die Klassifikationen im Wasser und an Land ohne in-situ Vorinformationen gewonnen werden können.

Als Grundlage für die Entwicklungsarbeit diente eine Messkampagne an der Ostseeküste nahe Wismar, die in ihrem Umfang bislang einzigartig war. Dafür wurden in einem

begrenzten Zeitraum durch mehrere Messteams umfangreiche Messungen aus der Luft, an Land und zu Wasser durchgeführt.

Ziel der Arbeit ist, eine maßgeschneiderte Datenbank für die spezifischen Reflexionen der Untergründe des Ostseebodens zu erstellen und diese auf den Einfluss Wassertiefenbestimmung zu untersuchen.

Ein Teilbeitrag für die Gesamtheit des Projekts und das gleichzeitige Ziel dieser Arbeit ist der Aufbau einer maßgeschneiderten spektralen Datenbank für die spezifischen Reflexionen der Untergründe der Ostsee, sowie den Einfluss dieser Bodenreflexionen auf die Wassertiefenbestimmung zu untersuchen.

Dazu werden zunächst einige Grundlagen für das Verständnis der optischen Gewässerfernerkundung, so wie das verwendete Modell Water Colour Simulator WASI eingeführt. Im zweiten Teil der Arbeit werden die verwendeten Messgeräte, durchgeführten Messmethoden sowie die Prozessierung der gewonnenen Daten vorgestellt. Zum Abschluss folgen die Ergebnisse der Datenbank und die der Untersuchung hinsichtlich des Einflusses auf die Wassertiefenbestimmung durch die Reflexion des Untergrunds, welche im letzten Abschnitt diskutiert werden.

2 Radiometrische Größen der optischen Fernerkundung

Für das Verständnis im weiteren Verlauf der Arbeit werden zunächst zwei radiometrische Variablen beschrieben, die für die Fernerkundung sehr wichtig sind. Das sind die Strahldichte und die Bestrahlungsstärke.

Die Strahldichte (L) (engl.: Radiance) ist eine radiometrische Größe, aus der alle weiteren Variablen abgeleitet werden können. Durch sie wird die räumliche (\vec{x}), zeitliche (t), gerichtete ($\hat{\xi}$), und spektrale (λ) Struktur eines Lichtfeldes charakterisiert (Mobley, 1994, S.23). Nach Mobley (1994) lässt sich die Strahldichte nach folgender Formel berechnen:

$$L(\vec{x}; t; \hat{\xi}; \lambda) = \frac{\Delta Q}{\Delta t \Delta A \Delta \Omega \Delta \lambda} [J s^{-1} m^{-2} sr^{-1} nm^{-1}] \quad (1)$$

Die Strahldichte beschreibt damit die Photonen einer Wellenlänge ($\Delta\lambda$) die in eine Richtung ($\hat{\xi}$) mit einer Strahlungsenergie (ΔQ) über den Zeitraum (Δt) und den Raumwinkel Winkel ($\Delta\Omega$) die Fläche (ΔA) erreichen. Abbildung 1 zeigt das Schema einer Messung der Strahldichte mit einem Strahldichte-Sensor.

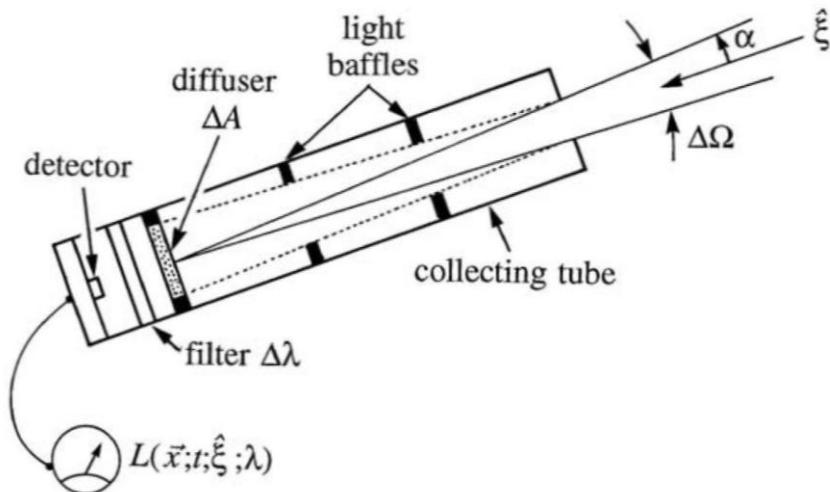


Abbildung 1: Schema eines Messinstruments zur Messung der Strahldichte L

Quelle: Mobley 1994, S.23

Werden die Intervalle der Parameter infinitesimal klein gesetzt ergibt sich daraus (Mobley, 1996):

$$L(\vec{x}; t; \hat{\xi}; \lambda) = \frac{\delta^4 Q}{\delta t \delta A \delta \Omega \delta \lambda} [W m^{-2} sr^{-1} nm^{-1}] \quad (2)$$

Für die Fernerkundung ist dabei die aufwärtsgerichtete Strahldichte (L_u ; engl.: upwelling Radiance) eine fundamentale Größe.

Im Gegensatz zur Strahldichte gibt die Bestrahlungsstärke (E) (engl.: Irradiance) die Energie der einfallenden Photonen (ΔQ) einer Wellenlänge ($\Delta\lambda$) über einen Zeitraum (Δt) auf eine Fläche (ΔA) aus allen Richtungen der Hemisphäre an (Mobley, 1996):

$$E(\vec{x}; t; \lambda) = \frac{\Delta Q}{\Delta t \Delta A \Delta\lambda} [W m^{-2} nm^{-1}] \quad (3)$$

Dabei wird in die hemisphärisch aufwärts (E_u ; upwelling Irradiance) und abwärts (E_d ; downwelling Irradiance) gerichtete Bestrahlungsstärke unterschieden. Sie kann entweder direkt gemessen oder aus der Strahldichte abgeleitet werden (Mobley, 1996). Die upwelling Radiance (L_u) ist als der Teil der downwelling Irradiance, der von der Wasseroberfläche oder einer Bodenprobe reflektiert wird und vom Strahldichte-Sensor mit Blickrichtung nach unten (Nadir) erfasst wird (Albert&Gege 2006).

3 Die optischen Eigenschaften von Gewässern

Die optischen Eigenschaften von Gewässern werden unterschieden in die inhärenten (auch primären, engl.: Inherent Optical Properties, IOPs) und die scheinbaren (auch sekundären, engl.: Apparent Optical Properties, AOPs) optischen Eigenschaften (Zimmermann, 1991, S.16). Der Unterschied zwischen den beiden ist, dass die IOPs nur vom Medium selbst bestimmt werden, während AOPs auch von der Geometrie des Lichtfeldes abhängig sind.

3.1 Scheinbare optische Eigenschaften

Scheinbare optische Eigenschaften beschreiben den Wasserkörper unter natürlicher Beleuchtung und stellen immer ein Verhältnis zwischen zwei radiometrischen Variablen dar, durch das Effekte der einfallenden Strahlung minimiert werden und sind daher wichtige Größen für die optische Fernerkundung von Gewässern (Mobley, 2001). Dabei sind sie von den optischen Eigenschaften des Wasserkörpers von den inhärenten optischen Eigenschaften, (Kapitel 3.2), sowie der Geometrie des Lichtfeldes abhängig. Zu den scheinbaren optischen Eigenschaften von Gewässern zählen unter anderem die Irradiance Reflectance $R(\lambda)$, die Remote Sensing Reflectance $R_{rs}(\lambda)$ und die Attenuationskoeffizienten der Bestrahlungsstärke und Strahldichte.

Das Verhältnis zwischen der aufwärtsgerichteten $E_u(\lambda)$ und der abwärtsgerichteten Bestrahlungsstärke $E_d(\lambda)$ ist die dimensionslose Irradiance Reflectance $R(\lambda)$ (Mobley, 1994, S.70; Mobley 2001):

$$R(\lambda) = \frac{E_u(\lambda)}{E_d(\lambda)} [\text{dimensionslos}] \quad (4)$$

Die Irradiance Reflectance einer Oberfläche ist die Albedo (Gege & Albert, 2006). In dieser Arbeit wird sie auch als Reflexion bezeichnet.

Die Remote Sensing Reflectance ist definiert als das Verhältnis zwischen der aufwärtsgerichteten Strahldichte, die das Wasser verlässt (L_w), und der abwärtsgerichteten Bestrahlungsstärke (E_d) (Mobley, 1994, S.70):

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_d(\lambda)} [sr^{-1}] \quad (5)$$

Dabei ist $L_w(\lambda)$ ausschließlich die Strahlung die das Wasser verlässt. Die am Sensor ankommende Strahldichte $L_u(\lambda)$ setzt sich zusammen $L_w(\lambda)$ sowie in der Atmosphäre gestreutes, und an der Wasseroberfläche reflektiertes direktes Sonnenlicht und diffuses Himmelslicht. Diese müssen entsprechend korrigiert werden.

Strahldichte und Bestrahlungsstärke nehmen unter typischen Ozeanbedingungen mit einer Beleuchtung durch die Sonne und den Himmel annähernd exponentiell mit der Tiefe ab. Vorausgesetzt die Sensoren sind weit genug von der Oberfläche und dem Untergrund entfernt (Mobley, 2001). Diese Abhängigkeit ergibt daher den Attenuationskoeffizient $K(\lambda)$ der Bestrahlungsstärke und $k(\lambda)$ der Strahldichte (Albert&Gege 2006; Mobley, 2001):

$$K(\lambda) = -\frac{1}{E(\lambda)} \frac{dE(\lambda)}{dz} [m^{-1}] \quad (6)$$

$$k(\lambda) = -\frac{1}{L(\lambda)} \frac{dL(\lambda)}{dz} [m^{-1}] \quad (7)$$

Im Gegensatz zu den inhärenten optischen Eigenschaften sind AOPs nicht additiv, was die Interpretation im Hinblick auf die Wasserinhaltsstoffe erschwert.

3.2 Inhärerente optische Eigenschaften

Die inhärennten optischen Eigenschaften sind unabhängig von der Geometrie des Lichtfeldes und somit reine Materialeigenschaften (Schröder, 2004). Durch sie werden die optischen Eigenschaften von natürlichen Gewässern in eine Form gebracht, die für die Strahlungstransfertheorie geeignet ist. Zu ihnen zählen die Streu- und Absorptionseigenschaften des Mediums, die durch den Absorptionskoeffizient $a(\lambda)$, den Streukoeffizient $b(\lambda)$ und die Volumenstreufunktion $\beta(\theta, \lambda)$ beschrieben werden können.

Absorptionskoeffizient $a(\lambda)$ und analog Streukoeffizient $b(\lambda)$ beschreiben die Strahlungsflussänderung $d\Phi$, die durch die Durchquerung einer Schicht der Dicke dr durch Absorption bzw. Streuung verursacht wurde, im Verhältnis zum einfallenden Strahlungsfluss (Schröder, 2004):

$$a(\lambda) = \frac{d\Phi_a(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)dr} [m^{-1}] \quad (8)$$

$$b(\lambda) = \frac{d\Phi_b(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)dr} [m^{-1}] \quad (9)$$

Die Volumentreufunktion $\beta(\theta, \lambda)$ ist dabei die Winkelverteilung der gestreuten Strahlung innerhalb dieser Schicht mit der Dicke dr und beschreibt den Anteil des einfallenden Strahlungsflusses eines Raumöffnungswinkels $d\Omega$, der relativ zur Einfallsrichtung in Richtung θ abgelenkt wird (Schröder, 2004):

$$\beta(\theta, \lambda) = \frac{d\Phi(\theta, \lambda)}{\Phi_0(\lambda)dr} \frac{1}{d\Omega dr} [m^{-1} sr^{-1}] \quad (10)$$

Eine Integration der Volumenstreufunktion über den rückwärtsgerichteten Halbraum ergibt den sogenannten Rückstreucoeffizienten (Schröder, 2004):

$$b_b(\lambda) = 2\pi \int_{\pi/2}^{\pi} \beta(\theta, \lambda) \sin \theta d\theta [m^{-1}] \quad (11)$$

Aus diesen drei inhärenten optischen Eigenschaften können weitere IOPs dargestellt werden, wie der Attenuationskoeffizient c , der die Summe aus a und b darstellt. Das Verhältnis von Streukoeffizient und Attenuationskoeffizient ergibt die Einfachstreualbedo ω_0 . Bei Gewässern mit sehr hoher Absorption ist ω_0 nahe Null (Schröder, 2004). IOPs können sich zwar über die Wassertiefe verändern, werden aber bei Entwicklung für analytische Methoden im Strahlungstransportmodell als konstant angesehen (Mertes et al., 2004).

3.3 Optische Eigenschaften von Wasser und Wasserinhaltsstoffen

Optische Eigenschaften von Gewässern sind sehr komplex. Sie werden zum einen durch die Streuung, Absorption und Emission der Wassersäule bestimmt, welche wiederum vom Wasser selbst und den darin enthaltenden Wasserinhaltsstoffen abhängig ist, und zum anderen durch die Reflexion des Untergrunds, falls dieser vom Licht erreicht wird. Der Einfluss verschiedener Substrate, wie beispielsweise Sand, Seegras, Muscheln, etc., unterliegt wiederum spezifischen Streu-, Absorptions- und in gewissem Maße auch Emissionseigenschaften (Dekker et al., 2002).

Nicht nur der Untergrund kann dabei sowohl großflächig als auch kleinflächig sehr heterogen sein, auch die im Wasser des Ozeans gelösten und suspendierten Inhaltsstoffe sind in ihrer Konzentration und ihren optischen Eigenschaften sehr variabel (Mobley, 2010). Dabei zählen diejenigen Substanzen, die einen Porenfilter von 0,4 m Größe passieren können, als gelöste Substanzen, und diejenige die im Filter verbleiben, als partikuläre lebendige und nicht lebendige Bestandteile (Mobley, 1994, S. 74).

Aufgrund dieser Inhaltsstoffe gibt es Bereiche in denen das Wasser tiefblau erscheint und das Sonnenlicht mehrere hundert Meter tief eindringen kann, aber auch gelblich-braune Bereiche, wie trübe Flussmünden, wo die Eindringtiefe des Lichts weniger als einen Meter beträgt. Die wichtigsten optischen Bestandteile des Ozeanwassers sind das Wasser selbst, Phytoplankton, Schwebstoff und der Gelbstoff. Wasser an sich absorbiert stark unter 250 nm und über 700 nm (Abbildung 2). Der Wellenlängenbereich für die optische Gewässerfernerkundung des Ozeans ist daher auf den nahen-UV bis zum nahen Infrarotbereich begrenzt (Mobley, 2010).

Zur Unterteilung von Gewässern führten Morel und Prieur (1977) ein zweiteiliges Klassifikationsschema ein, nachdem die Gewässer in zwei extreme Fälle, die sogenannten Case-1- und Case-2-Gewässer unterschieden werden können. In die erstgenannte Kategorie fallen die Gewässer, deren Wasserfarbe an erster Stelle durch die Absorptionseigenschaften des Phytoplanktons sowie dessen Abbauprodukten bestimmt wird, wie es in offenen Ozeanen der Fall ist. Zu den Case-2-Gewässern gehören Binnen- und Küstengewässer. Die stoffliche Zusammensetzung dort ist aufgrund des Eintrags aus angrenzender Landflächen oder Flüssen komplexer als in Case-1-Gewässern (IOCCG, 2000).

Die Absorptionseigenschaften (rot) sowie die Streueigenschaften von reinem Wasser sind in (blau) sind in Abbildung 2 dargestellt:

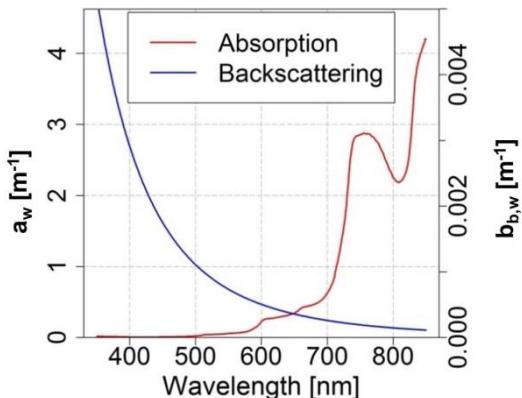


Abbildung 2: Absorption und Rückstreuung von reinem Wasser

Quelle: Daten des Water Colour Simulators (nach Lu, 2006, Pope&Fry, 1997, Kou et al., 1993, Morel, 1974)

Diese Absorption reinen Wassers gilt in der Fernerkundung auch für salzhaltige Ozeangewässer, da das gelöste Salz stark im UV-Bereich absorbiert und keine Auswirkungen auf die Absorptionseigenschaften im sichtbaren Bereich hervorruft (IOCCG, 2000, S. 41). Das im Wasser enthaltene Salz wirkt sich jedoch auf die Streueigenschaften aus.

Die Streuung von reinem Wasser wird nach Morel (1974) beschrieben als:

$$b_{b,W}(\lambda) = b_1 \left(\frac{\lambda}{500} \right)^{-4.32} \quad (12)$$

Wobei für Süßwasser $b_1 = 0,00111 \text{ m}^{-1}$ und für Ozeangewässer einer Salinität von 35-38 ‰. $b_1 = 0,00144 \text{ m}^{-1}$.

Zu diesen Streu und Absorptionseigenschaften von reinem Wasser addieren sich die optischen Eigenschaften der Wasserinhaltsstoffe Chlorophyll-a, Gelbstoff und Schwebstoff hinzu.

3.3.1 Chlorophyll-a

Für die Charakterisierung von Gewässern ist unter anderem die Konzentration von Phytoplankton entscheidend, da es die optischen Eigenschaften von Gewässern im sichtbaren Bereich wesentlich mitbestimmt. Diese kleinen Algen bilden die Grundlage der Nahrungskette und damit der Primärproduktion. Ihre Konzentration schwankt dabei sowohl regional als auch saisonal. Phytoplankton enthält die Pigmente Chlorophyll-a auch die Chlorophyll-b, -c oder Carotinoide deren Absorptionen sehr schwer voneinander unterschieden werden können, da sie sehr ähnlich sind und innerhalb einer Art stark schwanken. In der Fernerkundung werden Informationen über Phytoplankton über das Pigment Chlorophyll-a gewonnen, da das Pigment sehr wichtig für die Fotosynthese ist und daher in allen Phytoplanktonarten enthalten ist (Gege, 1994; Schröder 2004). Die Division der Absorptionskoeffizienten durch die entsprechende Chlorophyll-a-Konzentration ergibt den konzentrationsunabhängigen spezifischen Absorptionskoeffizienten in m^2/mg . Dieser ist in Abbildung 3 als eine gewichtete Summe mehrerer typischer Phytoplanktonarten für den Bodensee (Gege, 2015) dargestellt. Dabei sind zwei deutliche Absorptionsmaxima bei den Wellenlängen im Bereich um 430 nm und 670 nm zu erkennen:

Spezifische Phytoplanktonabsorption

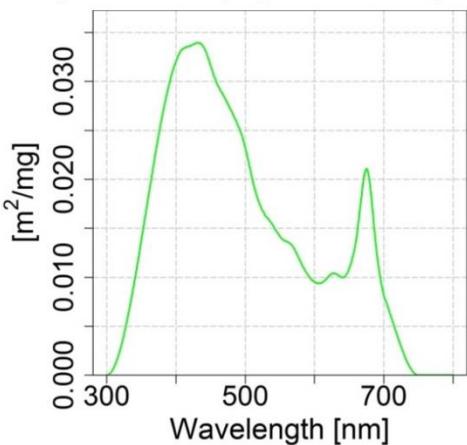


Abbildung 3: spezifischer Absorptionskoeffizient einer gewichteten Summe verschiedener Phytoplanktonarten

Quelle: Daten des Water Colour Simulators (Gege, 2015)

3.3.2 Schwebstoff (TSM)

Schwebstoffe (Total Suspended Matter, TSM) werden unterteilt in eine organische (Organic Suspended Matter, OSM) und anorganische (Inorganic Suspended Matter, ISM) Komponente. Organische Schwebstoffe werden auch Detritus genannt und sind Teile von abgestorbenen Plankton oder Ausscheidungen von Zooplankton (Albert, 2004). Die anorganische Komponente besteht hauptsächlich aus fein gemahlenem Quarzsand, Tonmineralien oder Metalloxiden und ist, wie beispielsweise in trüben Küstengewässern mit hohem Sedimenteintrag, oder auch in klarem Ozeangewässer, in die Schwebstoffe über den Wind eingetragen werden können, optisch oft wirksamer als die organische Komponente (Mobley, 1994, S. 76,77). Die Absorption von Schwebstoffen wird hauptsächlich durch die der organischen Komponente, welcher eine Exponentialfunktion ähnelt, bestimmt. Die Rückstreuung wird zum größten Teil durch die anorganische Komponente verursacht (Kirk, 1994).

3.3.3 Gelbstoff (CDOM)

Gelbstoff oder auch Gilvin, Yellow Substance, Coloured oder Chromoporic Dissolved Organic Matter (CDOM) genannt, ist ein Begriff für den Teil der gelösten organischen Substanz, der aufgrund seiner Absorptionseigenschaften gelblich erscheint. Er besteht aus Humin- und Fulvinsäuren, die durch den Abbau von abgestorbenen Phytoplankton entstehen oder unterseeische Quellen oder über Flüsse eingebracht werden, deren Gehalt über Böden mit hohem organischen Anteil akkumuliert wurde. Gebiete wie Küstengewässer in denen sich der Gelbstoffgehalt über Flüsse oder andere externe Quellen anreichert weisen sehr viel höhere Konzentrationen auf, als Gebiete, in denen er lokal entsteht, wie der offene Ozean (IOCCG, 2000). CDOM ist in natürlichen Gewässern einer der wichtigsten Lichtabsorbierenden Inhaltsstoffe. Die Absorption ähnelt einer Exponentialfunktion, ist im UV-Bereich am stärksten und geht im roten Spektralbereich

zwischen 650 und 700 nm gegen Null (Loiselle et al. 2009, Stedmon et al. 2000). Aufgrund dieser optischen Eigenschaften beeinflussen Gelbstoffe deutlich die Primärproduktion innerhalb einer Wassersäule. In den oberen Schichten begünstigen sie die Primärproduktion, da es die schädliche UV-Strahlung absorbiert, in tieferen Schichten führt diese Eigenschaft jedoch zu Lichtmangel (Stedmon et al., 2000). Sehr hohe Konzentrationen beeinflussen den Fotosynthesebereich PAR zwischen 400-700 nm negativ, sodass Licht dort zum limitierenden Faktor für fotosynthetreibende Algen wird (Linnemann et al., 2013).

Die Gelbstoffabsorption ist das Produkt der Konzentration und der spezifischen Absorption. Der spektrale Verlauf der CDOM-Absorption im sichtbaren Bereich gleicht einer Exponentialfunktion. Studien zeigten, dass sich der spektrale Verlauf durch eine Exponentialfunktion mittels einer bestimmten Referenzwellenlänge λ_0 beschreiben lässt (Bricaud et al. 1981):

$$a_Y(\lambda) = a_Y(\lambda_0) * e^{(-S(\lambda-\lambda_0))} \quad [m^{-1}] \quad (13)$$

Dabei hängt die Absorption $a_Y(\lambda)$ von der Gelbstoffkonzentration des Wassers ab während die Steigung S auch durch die Zusammensetzung der Verbindungen bedingt ist. Sowohl die Konzentration als auch die Anteile der jeweiligen Verbindungen unterliegen einer hohen Variabilität und sind schwer zu messen, weshalb in der Fernerkundung die Absorption der jeweiligen Referenzwellenlänge λ_0 sowie die dazugehörige Steigung S angegeben werden. In der Literatur werden dabei verschiedene Referenzwellenlängen benutzt. In dieser Arbeit wurde $\lambda_0 = 440$ verwendet. Bisher gibt es noch kein Modell, das in der Lage ist die Gelbstoffabsorption aus gegebenen Konzentrationen abzuleiten (Mobley 1994). Im Vergleich zur den starken Absorptionseigenschaften des Gelbstoffs ist der Einfluss durch die Streuung so gering, dass er bei der Beschreibung der optischen Eigenschaften von Küstengewässern vernachlässigt wird (Schröder 2014).

Bei bekannten Zusammenhängen dieser inhärenten und scheinbaren optischen Eigenschaften, sowie ein genügend Informationen über die optischen Eigenschaften von Wasserinhaltsstoffen und die Reflexion des Untergrunds können die zu erwartenden Reflexionen (Remote Sensing Reflectance) eines Wasserkörpers simuliert und Parameter von Interesse (wie beispielsweise die Wassertiefe) durch geeignete Modelle aus gemessenen in-situ Daten, Flugzeug- oder Satellitendaten mittels Inversion gewonnen werden. Dazu werden bio-optische Modelle verwendet, die auf der Basis von umfassenden in-situ Messungen entwickelt wurden. Solche Modelle beschreiben den Zusammenhang zwischen den inhärenten optischen Eigenschaften der einzelnen Inhaltsstoffe und deren Konzentration im Strahlungstransport (Schröder 2004). Der Water Colour Simulator WASI ist ein solches Modell, mit dem eine Reihe von Daten dieser Arbeit ausgewertet wurden.

4 Water Colour Simulator – WASI

Die Daten bestimmter Messgeräte oder Sensoren werden gewöhnlich mit der dazugehörigen spezifischen Software analysiert. Das bedeutet für Messungen mit unterschiedlichen Sensoren muss auf mehrere Programme zurückgegriffen werden, was zu Fehlern führen kann und die Datenverarbeitung aufwändiger gestaltet. Aus diesem Grund wurde der Water-Colour-Simulator „WASI“ entwickelt, ein einheitliches und sensorunabhängiges Software-Tool, das in der Lage ist, optische in-situ Messungen zu analysieren (Inverse Modeling) oder zu simulieren (Forward Modeling). Alle Input-Daten für die Berechnungen des Programms liegen dabei in Textformat (ASCII-Dateien) vor und können für die regionalen Begebenheiten ausgetauscht werden (Gege&Albert 2006).

In WASI werden die unbekannten Parameter durch nichtlineare Kurvenanpassung (im Weiteren bezeichnet als „Fit“) bestimmt. Dabei wird in der ersten Iteration ein Modellspektrum anhand konstanter und variabler Parameter erzeugt und mit dem gemessenen Spektrum verglichen. Bei jeder Iteration werden die variablen Parameter (=Fit-Parameter) vom Programm geändert, was zu einer Änderung des modellierten Spektrums und somit der Residuen führt. Für jede Variable kann dazu ein Bereich für mögliche Parameterwerte der einzelnen Variablen eingegrenzt werden. Das Ergebnis-Spektrum der iterativen Modellierung ist erreicht, wenn das Residuum unter einen vordefinierten Schwellenwert fällt oder eine voreingestellte Anzahl an Iterationen erreicht ist. Die dabei verwendeten Fit-Parameter des Programms liefern so das Ergebnis der gesuchten Variablen (Gege & Albert 2006). In Tabelle 1 sind die in dieser Arbeit verwendeten Variablen dargestellt:

Tabelle 1: Symbolerklärung der Parameter in WASI

Symbol	Beschreibung	Einheit
C[i]	Konzentration der Phytoplanktonklasse Nr. i. i= 0-5	µg/l
C_X	Konzentration von Schwebstoff (Typ 1)	mg/l
C_Y	Absorption von Gelbstoff, $\lambda_0 = 440$ nm	m ⁻¹
S	Spektrale Steigung der Gelbstoffabsorption	1/nm
z	Sensor-Tiefe	m
zB	Wassertiefe*	m
fA[i]	Anteil der des Bodens vom Typ i	-
T_W	Wassertemperatur	°C
sun	Sonnenzenithwinkel	°

*zB ist die Wassertiefe, nicht zu verwechseln mit dem Abstand zwischen Sensor und Grund.

Da die Kombinationsmöglichkeit der Parameter praktisch unendlich ist, ist ein effektiver Algorithmus notwendig, der die Fit-Parameter von der einen zur nächsten Iteration wählt.

WASI nutzt dazu den Simplex-Algorithmus (Nelder&Mead, 1965; Caceci&Cacheris, 1984, nach Gege&Albert 2006). Dieser hat im Vergleich zu anderen gebräuchlichen Algorithmen den Vorteil, dass er immer konvergiert und, da er ohne Matrix Operationen auskommt, die Rechenzeit sehr schnell ist. Dieser Algorithmus findet die Parameterkombination gewöhnlich nach $20 \times (\text{Anzahl der Variablen})^2$ Iterationen (Caceci&Cacheris, 1984).

Nachfolgend wird das Modell in WASI beschrieben, dass für die in der Fernerkundung sehr wichtige Remote Sensing Reflectance benutzt wird.

Durch eine Wasserschicht einer gewissen Dicke, ändert sich der Reflexionsgrad des darunter befindlichen Untergrunds sowie seine charakteristische Wellenlängenabhängigkeit (Gege, 2014a). Die Remote Sensing Reflectance $R_{rs}(\lambda)$ liefert Informationen über die Mächtigkeit des Wasserkörpers sowie den Untergrund und kann durch die folgende Gleichung (14) beschreiben werden (Albert&Mobley, 2003; Albert 2004, nach Gege, 2014a):

$$R_{rs}^{sh-}(\lambda) = R_{rs}^{deep-}(\lambda) \cdot [1 - A_{rs,1} \cdot \exp\{- (K_d(\lambda) + k_{uW}(\lambda)) \cdot z_B\}] \\ + A_{rs,2} \cdot R_{rs}^b(\lambda) \cdot \exp\{- (K_d(\lambda) + k_{uB}(\lambda)) \cdot z_B\} \quad (14)$$

Das hochgestellte *sh* steht für flaches (shallow), das *deep* für tiefes Wasser und das *b* für den Untergrund (bottom). Das dahinter befindliche „Minus“ ist ein Symbol für Messungen knapp unterhalb der Wasseroberfläche. Der erste Term beschreibt dabei den Einfluss der Wasserschicht der Dicke z_B und der zweite den Einfluss des Untergrunds. Da das reflektierte Licht das Wasser somit zweimal durchquert hat, wird es auf beiden Wegen abgeschwächt. Dieser Vorgang geht in die Gleichung über die Dämpfungskoeffizienten der abwärtsgerichteten Bestrahlungsstärke (K_d), den für die aufwärtsgerichtete Strahldichte des Wassers (k_{uW}) und den des Untergrunds (k_{uB}) mit ein (Gege, 2014a). Dabei sind $A_{rs,1}$ und $A_{rs,2}$ empirische ermittelte Parameter und sind in WASI für die Berechnungen in flachen Gewässern als $A_{rs,1} = 1,1576$ und $A_{rs,2} = 1,0389$ (nach Albert&Mobley, 2003) gegeben (Gege&Albert, 2006).

Die Reflexion des Untergrunds ist für eine Mischung von bis zu 6 Bodentypen implementiert als:

$$R_{rs}^b(\lambda) = \sum f_i \times B_i \times R_i^b(\lambda) \quad (15)$$

Dabei ist jeder Untergrundtyp (Substrattyp) in Form eines Irradiance Reflectance Spektrums $R_i^b(\lambda)$ charakterisiert und hinterlegt. B_i ist der Anteil der Strahlung die zum Sensor reflektiert wird, wenn der Untergrund zu 100% des Substrat-Typ i bedeckt ist. Um den Untergrund als Lambert-Reflektor mit isotroper Reflexion darzustellen wird $B_i = 1/\pi = 0.318 \text{ sr}^{-1}$ berechnet. f_i steht für den Anteil des jeweiligen Untergrunds eines Pixels und in diesem Fall eines gemessenen Spektrums. Hier gilt $\sum f_i = 1$ (Gege, 2014a).

Die Werte können je nach Einstellung der Grenzen des Modells Werte über 1 annehmen, da die Reflexionen der Untergründe keine isotropen Reflektoren darstellen und daher in verschiedenen Winkeln unterschiedlich stark reflektieren können.

Die Dämpfungskoeffizienten K_d , k_{uW} und k_{uB} (Gleichungen (16), (17) und (18)) sind abhängig vom Zenithwinkel der Sonne ($\cos \theta'_{sun}$) dem Blickwinkel, der Absorption $a(\lambda)$ und der Rückstreuung des Wasserkörpers $b_b(\lambda)$. Bei K_d wird dabei ein Koeffizient κ_0 im Modell mit dem Wert $\kappa_0 = 1.056$ von Albert und Mobley (2003) verwendet, der für Case-2-Gewässer über Simulationen ermittelt wurde. Die Parameter in Gleichung (17) und (18) wurden ebenfalls aus Albert und Mobley (2003) übernommen. (Albert & Gege, 2004).

$$K_d(\lambda) = \kappa_0 \cdot \frac{a(\lambda) + b_b(\lambda)}{\cos \theta'_{sun}} \quad (16)$$

$$k_{uW}(\lambda) = \frac{a(\lambda) + b_b(\lambda)}{\cos \theta'_{sun}} \cdot [1 + \omega_b(\lambda)]^{3.5421} \cdot \left[1 + \frac{0.2786}{\cos \theta'_{sun}} \right] \quad (17)$$

$$k_{uB}(\lambda) = \frac{a(\lambda) + b_b(\lambda)}{\cos \theta'_{sun}} \cdot [1 + \omega_b(\lambda)]^{2.2658} \cdot \left[1 + \frac{0.0577}{\cos \theta'_{sun}} \right] \quad (18)$$

Die Funktion $\omega_b(\lambda)$ wird ebenfalls durch die Absorption $a(\lambda)$ und die Rückstreuung $b_b(\lambda)$ des Wassers definiert und ergibt sich aus:

$$\omega_b(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (19)$$

Der Großteil der Absorption eines natürlichen Wasserkörpers $a(\lambda)$ setzt sich zusammen aus der Absorption von reinem Wassers a_w , die relativ gut bekannt ist, und der Absorption der Wasserinhaltsstoffe a_{wc} (Gege & Alblert, 2006). Dabei ist die Absorption reinen Wassers temperaturabhängig:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + (T - T_0) * \frac{da_w(\lambda)}{dT} + a_{wc} \quad (20)$$

a_{wc} ergibt sich aus der Summe der einzelnen Absorptionskoeffizienten (Gege & Alblert 2006):

$$a_{wc}(\lambda) = C * a_c^*(\lambda) + X * a_x^*(\lambda) + Y * a_y^*(\lambda) \quad (21)$$

Die mit Stern versehenen Größen sind die spezifischen, d.h. auf Konzentration oder Wellenlänge normierten Absorptionskoeffizienten von Phytoplankton (a_c^*), Schwebstoff (a_x^*) und Gelbstoff (a_y^*). C ist die Phytoplankton-, X die Schwebstoffkonzentration und Y die Gelbstoffabsorption bei 440 nm.

Die Rückstreuung ist dabei die Summe der Rückstreuung des Wassers selbst $b_{b,W}(\lambda)$ und die der suspendierten. Dafür wird in WASI der Schwebstoff unterschieden in große Partikel (L) bei und kleine Partikel (S) unterschieden (Gege&Albert, 2004):

$$b_b(\lambda) = b_{b,W}(\lambda) + C_L * b_{b,L}^*(\lambda) * b_L(\lambda) + C_S * b_{b,S}^*(\lambda) * \left(\frac{\lambda}{\lambda_S}\right)^n$$

Damit wird die Streuung durch große Partikel durch einen Streukoeffizienten mit beliebiger Wellenlängenabhängigkeit definiert $b_L(\lambda)$ wohingegen die der kleinen Partikel durch eine Streukoeffizienten gegeben ist, der dem Angström-Gesetz $\left(\frac{\lambda}{\lambda_S}\right)^n$ folgt (Gege, 2015). (22)

So kann bei gegebener bzw. gemessener Remote Sensing Reflectance unterhalb der Wasseroberfläche durch Iterative Änderung der einzelnen Parameter eine Fit-Kurve an die Ausgangskurve angepasst, und die Parameter als Ergebnis ausgegeben werden. Durch den Einfluss der zahlreichen Variablen kann es dabei unter Umständen zu Mehrdeutigkeiten kommen, da die Möglichkeit besteht, denselben Fit aus verschiedenen Parameterkombinationen zu erhalten.

5 Material und Methoden

Nachfolgend werden das Untersuchungsgebiet, die Messgeräte und die Messmethodik beschrieben, sowie die anschließende Prozessierung der gewonnen Daten.

5.1 Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Die Ostsee zählt zu den größten Brackwassermeeren der Erde. Mit einer Fläche von 412.560 km² erstreckt sie sich ca. 1300 km von Süd nach Nord (54°-66° N) und ca. 1000 km (10°-30° E) von West nach Ost. Das Wasservolumen liegt bei 21 631 km³ und entspricht damit rund der Hälfte der Nordsee. Maximale Breite des Meeres liegt bei 300 km und die tiefste Stelle (im Landsorttief, westliches Gotland Becken) bei 459 Metern. Im Mittel ist die Ostsee 52 Meter tief (IOW, 2014).

Das Meer gilt immer noch als stark eutrophiert, obwohl die Nährstoffeinträge dank intensiver Bemühungen zurückgehen. Diese Stickstoff- und Phosphateinträge stammen aus der Düngung landwirtschaftlicher Flächen, der Tierproduktion und aus Abwässern der Industrie und Kommunen der Einzugsgebiete. Im Jahr 2010 erreichten knapp 30.000 Tonnen Stickstoff und 780 Tonnen Phosphor die deutsche Ostsee, wobei über die Hälfte davon über die Trave und 17% aus über die Warnow eingetragen wurden (Umweltbundesamt 2014). Die Trave mündet dabei etwa 25 km westlich und die Warnow bei Rostock ca. 55 km östlich des Untersuchungsgebiets der Kampagne in die Ostsee. Dort werden die Phosphat-Zielwerte des Helsinki-Übereinkommens zum Schutz der Meeresumwelt des Ostseegebiets (HELCOM) noch immer um das doppelte überschritten (Umweltbundesamt, 2014). Der hohe Nährstoffgehalt führt nicht nur zu verstärktem Phytoplankton-Wachstum sondern verändert auch deren Zusammensetzung. So ging der Anteil an Diatomeen (Kieselalgen) zurück, dafür stieg der von Dinoflagellaten (Panzergeißer). Auch teilweise giftige Algenblüten treten vermehrt auf, wie die von Blaulalgen (Cyanobakterien). Durch den Anstieg des Phytoplanktons wird die Sichttiefe geringer, wodurch submerse Makrophyten wie beispielsweise das Seegras und andere Großalgen immer in flachere Gewässer wandern müssen. Ein weiteres Problem ist, dass abgestorbene Phytoplankton (Detritus) von Mikroorganismen unter Sauerstoffverbrauch und der Abgabe von Schwefelwasserstoff abgebaut wird. Folglich führt die Eutrophierung zu einem Sauerstoffmangel (Bobsien, 2014).

In der Ostsee dominiert gewöhnlich die Absorption durch Gelbstoff das optische Signal, da dort die Konzentration im Vergleich zu anderen marinen Gebieten vergleichsweise hoch ist. So wurden in der Ostsee mittlere Werte von $S=0.0193 \pm 0,0024$ gemessen. In anderen marinen Gebieten liegen Werte von 0.0165 ± 0.0035 vor (Schwarz et al. 2002, in Kratzer et al. 2011).

Die Messungen erfolgten in der sogenannten „Wismarbucht“ oder auch „Wismarer Bucht“. Diese hat eine Größe von 23.828 ha (Umweltministerium Mecklenburg-Vorpommern, 2006). Der Verlauf der Küstenlinie der Bucht und des Salzhaffs mit deren Buchten und Wieken bildet im Wesentlichen den Verlauf der Eisrandlage des letzten Eisvorstoßes ab. Die Küste ist sehr abwechslungsreich und enthält offene und geschlossenen Buchten mit tiefen Rinnen und flachen Stellen, Abtrags- und Anlandungsbereichen von Sediment sowie exponierte und geschützte Abschnitte. So bietet sie unterschiedliche Lebensräume für viele verschiedene Pflanzen- und Tierarten. Aufgrund der geringen Neigung des Meeresbodens von Boltenhagen bis zur Halbinsel Wustrow sind die Wassertiefen der Küstengewässer dementsprechend auf großer Fläche sehr gering. Ein unterseeisches Rinnen- und Kuppensystem nördlich und nordwestlich der Insel Poel sowie der Wohlenberger Wiek bildet eine Besonderheit der äußeren Wismarbucht. Östlich von Boltenhagen befindet sich die Lieps, eine Sandbank, die nur bei Hochwasser überflutet ist und somit zeitweise trocken liegt. Außer der Lieps existieren noch weitere solcher Kuppen. Südlich von Poel ist die innere Wismarbucht ein Boddengewässer ohne ausgeprägten estuarinen Charakter. Da die einmündenden Flüsse sehr klein sind und deshalb wenig Süßwasser zuführen und zusätzlich ein guter Wasseraustausch mit der Mecklenburger Bucht stattfindet, ist der Salzgehalt kaum von dem der Ostsee zu unterscheiden (Umweltministerium Mecklenburg-Vorpommern, 2006).

Für die Kampagne wurde der Monat April gewählt, da im Rahmen einer Bachelorarbeit durchgeföhrten Studie festgestellt wurde, dass in diesem Zeitraum die Secchi-Tiefe bzw. Sichttiefe in der Ostsee optimal ist (Hübner, 2014). Zu diesem Zeitpunkt ist die Wahrscheinlichkeit einer geringen Trübung und einer geringen Vegetationsausprägung sehr wahrscheinlich.

5.2 Messstellen

Anhand von Karten der Sedimentverteilung des Ostseebodens und der Wassertiefen wurden die Messstellen so gewählt, dass die Variabilität des Untergrunds im Kampagnengebiet bestmöglich erfasst wurde und die Wassertiefen möglichst gleichmäßig verteilt waren. Einige der geplanten Stationen wurden während der Kampagne aufgrund der Wetterbedingungen und der daraus eingeschränkten Befahrbarkeit an die Gegebenheiten angepasst. Auf der Karte in Abbildung 4 sind die Stationen der Schiffsmessungen dargestellt:

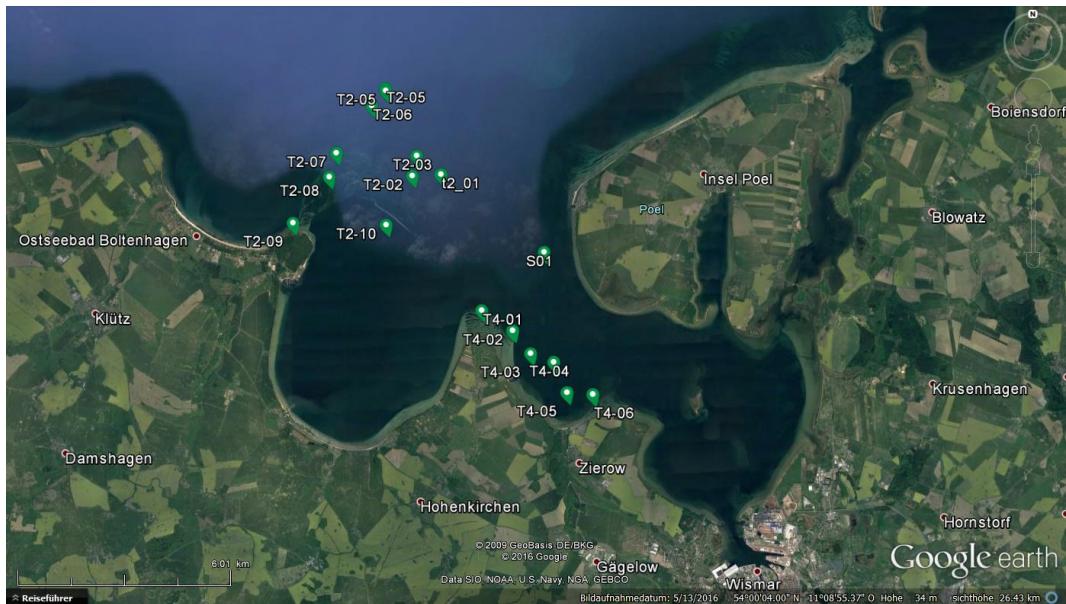


Abbildung 4: Messstationen der Schiffskampagne

Quelle: Google Earth (2016)

Insgesamt wurden 19 Stationen untersucht. Diese wurden mit dem Hilfsschlepper „Warnow“ des Deutschen Marinekommandos angefahren. An den Stationen wurde nicht geankert, um den Untergrund nicht aufzuwirbeln. Aufgrund des starken Windes und der damit einhergehenden Wellen war die Ostsee für die Warnow am 11.04.2016 nicht befahrbar. Deshalb mussten die Messungen nach der ersten Station (S1) abgebrochen werden. Am 13.04.2016 konnten Messungen an 8 Stationen und am 14.04.2016 an insgesamt 9 Stationen durchgeführt werden (siehe Tabelle 2). Dabei war das Wetter an dem zweiten Tag der Kampagne teils wolkig und neblig und der letzte Tag wies die besten Bedingungen auf. Die Station T2-05 wurde an zwei Tagen angefahren. T2-05_1 am 13.04.2016 und T2-05_2 am 14.04.2016. Das Testgebiet T2 bzw. die Stationen liegen dabei teilweise auf der bereits oben beschriebenen Sandbank Lieps. Informationen wie Uhrzeit, Sichttiefe, Koordinaten und Sonnenzenithwinkel der Stationen sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Übersicht über die Messstellen

Station	Zeit (MESZ)	Datum (2016)	ST [m]	WT [m]	Lat (WP)	Lon (WP)	SZA [deg]
S1	09:55-11:15	11.04.	7.20	9.20	53.9822637	11.3625691	60.49-51.46
T2-01	09:46-11:09	13.04.	>WT	4.60	54.0030799	11.3172406	61.01-51.35
T2-01a	11:35-11:43	13.04.	NA	5.10 ¹	54.0013973	11.3156369	49.01-48.38
T2-02	11:49-	13.04.	4.90	6.40	54.0027858	11.3044842	47.94-
T2-02a²	12:21-12:31	13.04.	NA	> 10	54.0021667	11.3074483	46.02-45.72
T2-03	12:57-13:38	13.04.	6.00	11.10	54.0080963	11.3064913	44.87-44.94
T2-05_1	13:53-14:05	13.04.	5.00	6.30	54.0261324	11.2925018	45.36-45.82
T4-01	14:45-15:17	13.04.	>WT	3.70	53.9673037	11.3348030	48.14-50.85
T4-02	15:23-15:42	13.04.	5.00	7.50	53.9619832	11.3482938	51.43-53.39
T4-03	09:02-09:44	14.04.	>WT	4.40	53.9560306	11.3560376	66.98-61.23
T4-04	09:49-10:11	14.04.	>WT	5.10	53.9537071	11.3660751	60.57-57.76
T4-05	10:15-10:39	14.04.	5.10	5.40	53.9458857	11.3716914	57.27-54.44
T4-06	10:44-10:57	14.04.	>WT	3.40	53.9453236	11.3829424	53.88-52.49
T2-10	11:37-12:07	14.04.	>WT	4.50	53.9899377	11.2928551	48.85-46.76
T2-05_2	12:54-13:15	14.04.	>WT	5.80	54.0255788	11.2926832	44.94-44.73
T2-06	13:25-14:02	14.04.	>WT	5.20	54.0215986	11.2864797	44.77-45.68
T2-07	14:11-14:26	14.04.	>WT	4.30	54.0090894	11.2706661	46.07-46.88
T2-08	14:32-14:50	14.04.	>WT	2.50	54.0027472	11.2675836	47.25-48.53
T2-09	15:03-15:32	14.04.	>WT	3.60	53.9907590	11.2516056	49.58-52.32

¹ Keine Messung mit dem Schiffecholot: die Wassertiefe stammt aus Daten des Ramses-Systems

² Keine Messung mit dem Schiffecholot: Koordinaten sowie die Wassertiefe stammen aus Daten des Ramsessystems. Die Tiefe liegt außerhalb des Messbereichs des Sonars.

Die Koordinaten sind die des mit dem GPS während der Station aufgezeichneten Wegpunktes. >WT bedeutet, dass die Sichttiefe größer als die Wassertiefe und damit der Grund sichtbar war.

5.3 Messgeräte und Messmethoden

Die einzelnen Messungen bzw. die Probengewinnung wurden mit mehreren Instrumenten durchgeführt. Diese sowie die dazugehörige Messmethode werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

5.3.1 Messung der Sichttiefe mit der Secchi-Scheibe

Für die Messung der Sichttiefe wurde eine Secchi-Scheibe für Ozeangewässer benutzt. Die mit weißem Kunststoff beschichtete Bronzescheibe hat einen Durchmesser von 20 cm und ist mit Aussparungen versehen (Abbildung 5). In der Mitte der Scheibe ist statt einer Senkschnur ein Maßband befestigt um direkt die Tiefe ablesen zu können. Für die Messung der Sichttiefe wurde die Scheibe bis zu der Tiefe herabgelassen, an der sie gerade nicht mehr sichtbar war, der Wert am Maßband auf Höhe der Wasseroberfläche abgelesen und notiert.



Abbildung 5: Messung der Sichttiefe mit der Secchi-Scheibe

Quelle: Foto Peter Gege (2016)

5.3.2 Messung der Wassertiefe mit dem Echolot am Schiff

Der Hilfsschlepper Warnow ist mit dem Echolot Humminbird Fishfinder FF565x der Firma Techsonic Industries INC. ausgestattet, welches am tiefsten Punkt des Vorschiffbereichs des Schiffs mit einer Einbautiefe von 90 cm unter der Wasseroberfläche angebracht ist. Der Gesamttiefgang des Bootes liegt ebenfalls bei 90 cm. Durch einen Zwei-Frequenz-Geber kann die Messung entweder mit einem 20° oder bei 60° Sendekegel stattfinden (Humminbird, 2008). Die Messungen der Wassertiefe während der Kampagne wurden mit einem Sendekegel von 60° gemessen. Der Tiefgang des Schiffs und die Platzierung des Echolots wurden bei der Messung berücksichtigt. An einigen Stationen wurde die Wassertiefe zusätzlich mit dem Maßband des Bodengreifers oder dem der Secchi-Scheibe gemessen.

5.3.3 Entnahme von Bodenproben mit dem Bodengreifer nach Ekman-Birge

Mit Hilfe eines Bodengreifers nach Ekman-Birge wurden die Sedimentproben für die spektrale Vermessung des Untergrundes gewonnen. Der Metallkasten misst 15x15x20 cm. Die Schaufeln werden für die Probenahme gespannt und können durch Auslösen eines Mechanismus geschlossen werden. Die beiden dünnen Klappen an der Oberfläche sorgen dafür, dass die Probe beim Herausziehen nicht ausgewaschen wird (Hydro-Bios, 2016).

An allen Stationen (außer T2-02a) wurde mit dem Greifer Sediment bzw. Vegetation oder Muscheln hervorgeholt und zur weiteren Vermessung auf eine schwarze Teichfolie gelegt.



Abbildung 6: Entnahme von Bodenproben mit dem Ekman-Birge-Greifer

Quelle: Foto Peter Gege (2016)

Dazu wurde der Mechanismus gespannt und der Greifer abgelassen bis er in den Meeresboden eingedrungen ist. Durch das herablassen eines Fallgewichts entlang der Schnur löste der Mechanismus aus und die Schaufeln sprangen zu. Das darin befindliche Sediment, bzw. Pflanzen, Muscheln usw. konnte anschließend auf das Schiff gezogen und mit dem Ibsen-Spektrometer vermessen werden. Bei sandigem Untergrund musste der Vorgang teilweise wiederholt werden, da der Untergrund bei Sandböden zu hart war, sodass der Greifer nicht in den Boden eindringen und demzufolge keine Probe an die Oberfläche geholt werden konnte. Eine Auswahl an Sedimentproben (ausschließlich Sand, Sediment und Ton) wurde im Spektroskopie-Labor im DLR in Oberpfaffenhofen zusätzlich mit einem ASD FieldSpec Pro ® unter Laborbedingungen vermessen (Kapitel 5.3.7).

5.3.4 Ibsen – Spektrometer

Für die Messungen der Strahldichte L der reflektierten Strahlung der Bodenproben (Sediment, Wasserpflanzen usw.) wurde ein System verwendet, das auf dem Spektrometer FREEDOM VIS 360-830 OEM der Firma Ibsen basiert. Dieses System wurde für die Kampagne in ein wasserfestes Gehäuse eingebaut und damit feldtauglich gemacht. Die Abbildung 7 zeigt das Innere des Gehäuses (5). Darin befinden sich das Spektrometer (1), die Elektronik (2), das Glasfaserkabel (3) und ein USB-Anschluss (4).

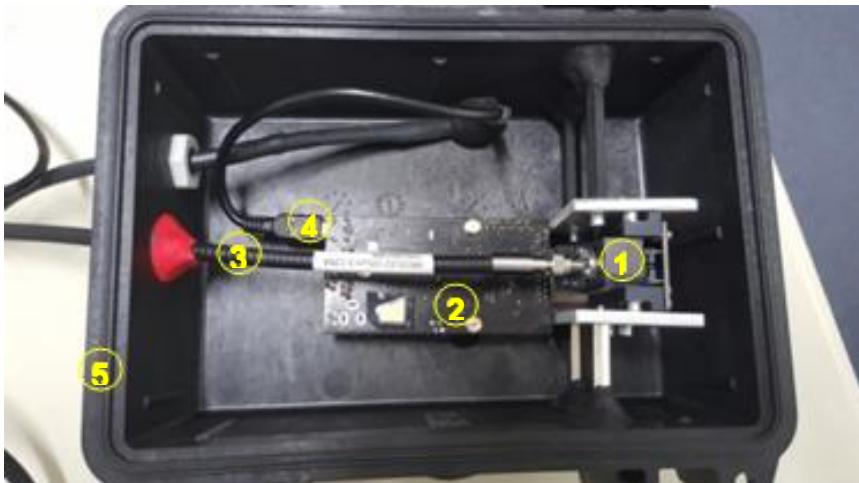


Abbildung 7: Ibsen-Spektrometer-System

Am Ende des Glasfaserkabels befindet sich die Optik des Systems, deren Öffnungswinkel bei $0,86^\circ \pm 0,01^\circ$ FWHM (Halbwertsbreite) liegt (Gege, 2010).

Das Spektrometer deckt eine Wellenlängenbereich von 315 bis 850 nm mit einer Auflösung von etwa 1,3 nm FWHM ab. Die Blendenöffnung liegt bei 0,16, der Wirkungsgrad des Gitters über den gesamten Wellenlängenbereich bei über 40% und der Einfluss von Streulicht unter 0,03 % (Ibsen Photonics, 2016).

Der eingebaute Hamamatsu-Detektor S10420-1006-01 ist besonders rauscharm. Der Detektor ist ein an der Rückseite verdünnter, ladungsgekoppelter CCD-Bildsensor, mit einer Pixelgröße von $14 \times 14 \mu\text{m}$ und einer Bildgröße von $14.336 \times 0,224 \text{ mm}^2$, welcher durch eine nahezu flache spektrale „Response“ und einem guten Wirkungsgrad im UV bis ins nahe Infrarot charakterisiert ist. Der Detektor deckt einen Wellenlängenbereich von 200 bis 1100 nm ab (Hamamatsu Photonics, 2016).

Die Software des Herstellers zur spektralen Vermessung wies einige Mängel hinsichtlich einfacher und fehlertoleranter Benutzbarkeit bei einer Kampagne auf, weshalb eine eigene Bediensoftware geschrieben wurde. Diese speichert zusätzlich zur Software des Herstellers nicht nur den Mittelwert der Einzelmessungen, sondern jede Einzelmessung selbst in einer ASCII-Datei ab.

Die spektrale Kalibration erfolgte durch den Hersteller. Die Gültigkeit wurde unter Feldbedingungen durch Vergleiche des Spektralverlaufs der gemessenen Bestrahlungsstärken mit Modellrechnungen überprüft. Durch die hohe spektrale Auflösung des Spektrometers, wird eine Vielzahl von Fraunhoferlinien erfasst. Die Lage dieser Linien ist sehr genau bekannt. Bei Vergleichen zwischen Modellrechnungen und Messungen wurden keine Unterschiede festgestellt.

5.3.5 Spektrale Vermessung der Bodenproben

Zur späteren Berechnung der Irradiance Reflectance mit dem Ibsen-Spektrometer die Strahldichte L, bzw. Upwelling Radiance Lu [$\text{mW m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$] gemessen.

Zu einer Spektralen Vermessung gehören immer die drei Teilmessungen:

- Messung des Dunkelstroms
- Messung der Referenz (Abbildung 8, links)
- Messung des Objekts (Abbildung 8, rechts)



Abbildung 8: Messung mit dem Ibsen-Spektrometer

Quelle: Foto Peter Gege (2016)

Alle drei Messungen müssen mit der gleichen Integrationszeit stattfinden. Daher wurde zunächst durch Testmessungen am Objekt oder an der Spectralonplatte die optimale Integrationszeit bestimmt, an der keine Sättigungseffekte zu erkennen waren. Anschließend wurde eine Dunkelstrommessung durchgeführt, indem die Optik des Ibsen mit einer Kappe abgedeckt wurde. Eine Spectralonplatte ist ein idealer diffuser Reflektor, und reflektiert in einem weiten Wellenlängenbereich vom nahen Infrarot bis in den UV-Bereich in alle Richtungen des Raumwinkels nahezu gleich. Im nächsten Schritt wurde für die Berechnung der einfallenden Strahlung das Spektrometer senkrecht über das Spectralon gehalten und ebenfalls eine Messung durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet Abschattungen der Platte zu vermeiden. Die Messung dient dazu um bei der späteren Prozessierung E_d berechnen zu können. Zuletzt wurden, je nach Art der des Untergrunds, eine oder mehrere Probenmessungen durchgeführt. Bei sehr heterogenen Proben wie zum Beispiel verschiedenen Gräsern und Muscheln wurden mehrere Messungen durchgeführt. Durch Kommentare wurden die Messungen beschrieben und dokumentiert. Die Kommentare und Messergebnisse werden als DN (Digital Numbers) in ASCII-Dateien abgespeichert und bei der späteren Prozessierung der Daten in Strahldichte umgerechnet.

5.3.6 Ramses-System und Messungen

Das Ramses-System für Spektralmessungen über und unter Wasser besteht aus einer Unterwasserkamera, einem Sonar und zwei zeitlich synchronisierten Spektrometern der Firma TriOS:

- E_d -Sensor: abwärtsgerichtete Bestrahlungsstärke [$\text{mW m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$]
- L_u -Sensor: aufwärtsgerichtete Strahldichte [$\text{mW m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$]

Diese messen über einen Wellenlängenbereich von 320 – 950 nm mit einer Abtastrate von 3,3 nm und einer Genauigkeit von 0,3 nm. Die Integrationszeit kann von 4 ms bis 8 s eingestellt werden (Trios, 2016).

Die Sensoren sind auf solche Weise an einem Gerüst befestigt, dass sich jeder der drei Sensoren auf gleicher Höhe und somit auch in gleicher Wassertiefe befindet (Abbildung 9). Auf derselben Höhe befindet sich auch ein Echolot (Digital Precision Altimeter PA500, Tritech), welches mit einer Genauigkeit von 1 mm den Abstand zum Grund innerhalb von 0,1 bis 10 m präzise misst (Tritech, 2016). Ebenso am Gerüst befestigt sind ein wasserfestes Gehäuse indem sich die Elektronik und ein GPS-Gerät befindet sowie eine wasserfeste Sony-Kamera. Das Gerüst wurde an einem klappbaren Ausleger mit einer Länge von 5 Metern befestigt (Abbildung 9), um die Sensorik möglichst weit vom Schiff entfernt in das Wasser herabgelassen zu können.

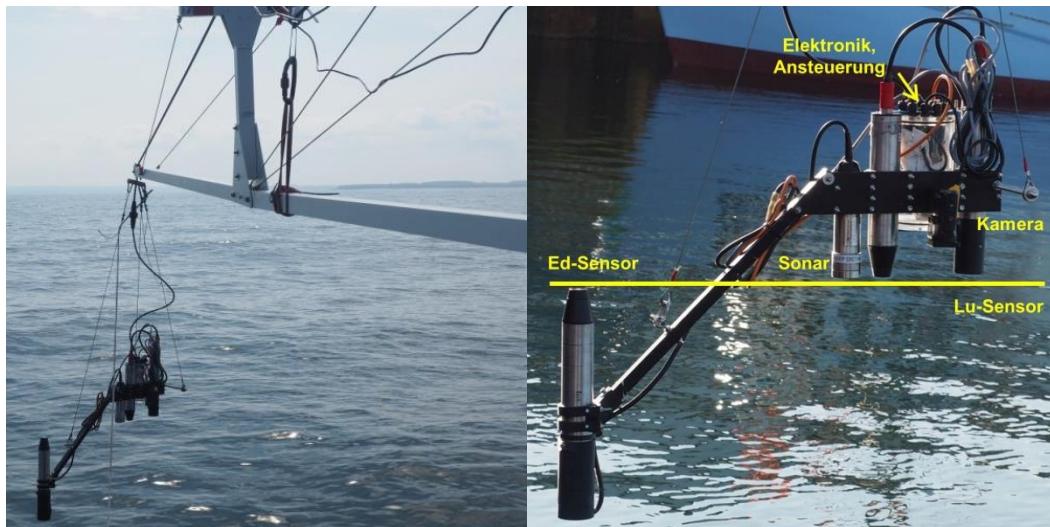


Abbildung 9: Ramses – System

Quelle: Foto Peter Gege (2016)

Das Kabel des Systems dient zur Datenübertragung, zur Stromversorgung und als Seil und ist an einem Leitungsroller aufgerollt. So kann das Messgerät in verschiedenen Wassertiefen oder über Wasser positioniert werden. Über eine Drehgeber am Leitungsroller, der an der Wasseroberfläche auf „Null“ gestellt werden muss, kann über die Bewegung der Kurbel der Seilwinde die aktuelle Tiefe des Sensors ermittelt werden. Diese und der Abstand zum Grund über das Echolot werden über die Software

angezeigt. Mit dem Ramses-System wurden Messungen über Wasser und etwa 0,5 Meter unterhalb der Wasseroberfläche durchgeführt.

Dabei wurde ebenfalls vor jeder Messung durch Testmessungen die optimale Integrationszeit ermittelt, mit welcher dann die tatsächliche Messung durchgeführt wurde. Nach der Messung über der Wasseroberfläche wurde das System bis knapp unter die Wasseroberfläche abgelassen, soweit, bis der Ed-Sensor durch Wellen oder Schaukeln des Schiffs nicht über die Wasseroberfläche hinausblicken konnte. Für diese Messung wurde das Sonar eingeschaltet. Die Unterwasserkamera ist für die Messungen über Meeresgrund gedacht. Dafür wurde die Kamera und das Sonar eingeschaltet und der Sensor bis 0,5–1,0 Meter über Grund positioniert und eine weitere Messung durchgeführt. Entgegen der Software des Ibsen-Spektrometers, werden die Messergebnisse mit der Ramses-Software bereits für jeden Sensor kalibriert. Die kalibrierte Strahldichte des L_u -Sensors und Bestrahlungsstärke des Ed-Sensors werden zusammen mit den dazugehörigen Rohdaten in einer ASCII-Datei abgespeichert.

Mit einer Unterwasserdigitalkamera von Sony, welche am Ramses-System befestigt war, wurden im Abstand von 5 Sekunden Unterwasserfotos aufgenommen. Diese dienen zur späteren Beurteilung der Reflexionsspektren des Untergrunds.

5.3.7 ASD FieldSpec Pro ® und Versuchsaufbau

Eine Auswahl an Sedimentproben wurde zusätzlich mit einem ASD FieldSpec Pro ® unter Laborbedingungen vermessen. Das auch während der Kampagne für die Feldmessungen an Land genutzte ASD FieldSpec Pro ® ist ein Spektrometer mit 2151 spektralen Kanälen und misst mit einer mittleren Bandbreite von ~2 nm in einem Wellenlängenbereich von 350-2500 nm. Dabei liegt die Bandbreite von 350-1050 nm bei 1,4 nm und im Bereich von 1000-2500 nm bei 2 nm, die spektrale Auflösung (FWHM) ist 3 nm bei 700 nm, 10 nm bei 1400 nm und 12 nm bei 2100 nm (FSF, 2016). Der Bereich wird durch 3 Detektoren abgedeckt. Der erste Detektor detektiert von 350-1000 nm, der zweite von 1000-1830 nm und der dritte von 1830- 2500 nm.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 10 links zu sehen, die Optik mit Blick auf die Probe rechts im Bild.



Abbildung 10: Versuchsaufbau im Spektroskopie-Labor.

Das Labor ist mit schwarzen Folien ausgekleidet damit möglichst wenig äußere Einflüsse auf das Signal wirken können. Die Optik, mit einem FWHM von 25° , ist in einem Abstand von 10 cm senkrecht an einem Stativ zur Probe ausgerichtet, welche von rechts und links mit einem Halogen- Strahler konstant und ohne Schatteneffekte beleuchtet wurde. Als Referenz diente hier die Messung einer nahezu 100% reflektierenden weißen Spectralonplatte.

Von den insgesamt 18 wurden 12 mit unterschiedlichen Wassergehalten erneut vermessen. Das bedeutet die Proben wurden mit Wasser gesättigt und bis zur vollkommenen Austrocknung in bestimmten zeitabständen gewogen und mit dem ASD Field Spec 2 ® ausgemessen. Die Vermessung des Sediments bei unterschiedlichen Wassergehalten diente für eine weitere Aufgabe des Projekts. Die im Rahmen dieser Arbeit interessante Messung ist die bei vollständiger Wassersättigung, dieselbe Bedingung wie während der Kampagne, kurz nach der Gewinnung der Proben.



Abbildung 11: Gesättigte Sedimentproben zur spektralen Vermessung im Labor

Quelle: eigenes Foto (2016)

Auch hier wurde Dunkelstrom, Referenz und Probe gemessen, für die Referenz diente dabei ein weißes Spectralon mit einer Reflexion von knapp unter 100%. Auf die Daten erfolgte eine Spectralon-Korrektur und eine ASD-Spektrometer Sprungkorrektur, da das Spektrometer aus 3 Detektoren besteht und zwischen den 2 Detektoren jeweils ein

Sprung zu sehen ist. Die Spectralon- Korrektur ist deshalb nötig, da die Software das Reflexionsspektrum als Prozentsatz in Bezug auf die Reflexion des Spectralons abspeichert. Da die Platte aber unter 100 % reflektiert würde so der Wert überschätzt werden.

5.3.8 Entnahme von Wasserproben

An 10 von den insgesamt 18 Stationen wurde mit einer elektrischen Pumpe und einem Schlauch in einer Wassertiefe von ca. 0.5-1 m jeweils eine 20 Liter Wasserprobe entnommen. Die entsprechenden Kanister wurden dunkel gelagert und am selben Tag dem Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) zur labortechnischen Analyse der Wasserinhaltsstoffe übergeben. Dabei wurden aus den Proben die Konzentration von Chlorophyll-a, die Konzentration von TSM (total suspended matter; Schwebstoff) unterschieden in ISM (inorganic) und OSM (organic) sowie die spektrale Absorption von CDOM (coloured dissolved organic matter; gelöstes organisches Material) bestimmt.

5.4 Datenverarbeitung

Der nachfolgende Abschnitt beschreibt die Prozessierung der gewonnenen Spektraldaten aus Ibsen- und Ramses-Messungen.

5.4.1 Ibsen-Daten

Korrektur des Dunkelstroms

Elektronen können spontan, aufgrund von Wärme, angeregt werden, auf den Detektor auftreffen und damit ein Signal erzeugen. Dieses erzeugte Signal ist der thermische Dunkelstrom, der von der Temperatur des Sensors abhängig ist. Darüber hinaus liegt an der Ausleseelektronik des Detektors eine Vorspannung an, die auch ohne Elektronen vom Detektor ein Messsignal liefert (Elektronischer Offset). Durch diese beiden Effekte werden die vom Licht erzeugten Signale um dieses sog. Dunkelstromsignal erhöht. Da es nicht konstant ist, wurde vor jeder Messung eine Dunkelstrommessung durchgeführt, indem der Sensor mit einer Abdeckkappe abgedunkelt wurde.

Im ersten Schritt der Datenverarbeitung wurde von jeder einzelnen Messung der Mittelwert des dazugehörigen Dunkelstroms abgezogen. Dieser Schritt erfolgt für die Sensor-Rohdaten in relativen Sensoreinheiten (DN, Digital Numbers).

Radiometrische Kalibrierung der Daten

Der nächste Schritt bestand darin, die dunkelstromkorrigierten Rohdaten mittels radiometrischer Kalibrierung in Strahldichte (L_u [$\text{mW m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$]) umzurechnen. Dazu erfolgte eine radiometrische Charakterisierung des Spektrometers in der Calibration Homebase, dem Kalibrierlabor des DLR. Dort wurden mit dem Ibsen-Spektrometer Messungen für verschiedene Integrationszeiten an einer sehr gut charakterisierten Lichtquelle, deren Strahldichte bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) geeicht wurde (Unsicherheit = 1%), durchgeführt. Aus diesen Messungen wurde die

spektrale Empfindlichkeit (Response) des Spektrometers errechnet und nichtlineare Effekte durch Änderungen der Integrationszeit erfasst.

Mit den Daten der Response des Ibsen für die jeweilige Integrationszeit und unter Berücksichtigung der Abweichung von der Linearität wurden die Daten mittels Formel (23) radiometrisch kalibriert und lagen anschließend in Einheiten von Strahldichte (L [$\text{mW m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$]) vor:

$$L_u(\lambda) = \frac{S_c(\lambda) * r(\lambda)}{n(\lambda) * t} \quad [\text{mW m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}] \quad (23)$$

$S_c(\lambda)$ steht für die dunkelstromkorrigierten Rohdaten, $r(\lambda)$ ist die Response des Ibsen, $n(\lambda)$ die Nichtlinearitätsfunktion und t die Integrationszeit.

Eine spektrale Kalibration wurde nicht durchgeführt, da das Spektrometer bereits vom Hersteller sehr gut kalibriert wurde.

Berechnung der abwärtsgerichteten Bestrahlungsstärke

Für die Bestimmung der abwärtsgerichteten Bestrahlungsstärke (Downwelling Irradiance, E_d) der einfallenden Strahlung aus den kalibrierten Ibsen-Daten in Strahldichte (L_u) wurden, wie in Kapitel 5.3.4 beschrieben, Messungen mit der Spectralonplatte durchgeführt. Um die Strahldichte der einfallenden Strahlung zu berechnen, wurde durch die spezifische Reflexion der Platte geteilt. Die Umrechnung von Strahldichte auf Bestrahlungsstärke erfolgt über die Multiplikation mit π (Formel (24)). Dies ist möglich, da die Oberfläche der Spectralonplatte einen diffusen Reflektor darstellt, in alle Richtungen gleich reflektiert. Vor der Berechnung wurden einzelne Messungen aufgrund von Sättigungseffekten entfernt.

$$E_d(\lambda) = \frac{\pi * L_{u,\text{Referenz}}(\lambda)}{R_{\text{Spectralon}}(\lambda)} \quad [\text{mW m}^{-2} \text{ nm}^{-1}] \quad (24)$$

$L_{u,\text{Referenz}}(\lambda)$ ist die Messung über der Spectralonplatte und $R_{\text{Spectralon}}(\lambda)$ die Reflexion der Platte. Für das wellenlängenabhängige Reflexionsspektrums der Platte existiert eine Die Reflexion der Platte ist wellenlängenabhängig und daher nicht konstant über alle Wellenlängen 10%. Die tatsächliche Reflexion (Abbildung 12) der Platte ist bekannt und wurde in den Berechnungen berücksichtigt.

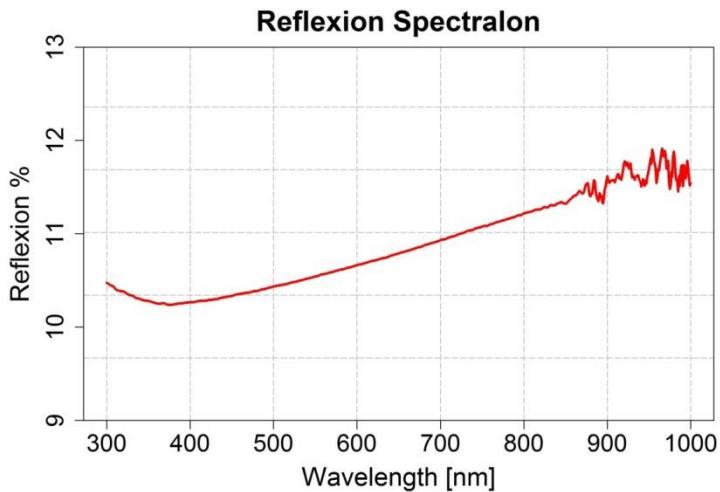


Abbildung 12: Reflexion des Spectralons

Quelle: eigene Darstellung

Nach den oben genannten Berechnungen lagen die Messungen von Wasseroberfläche und Bodenproben in Strahldichte und die Referenzmessungen bzw. die Messungen der einfallenden Strahlung in Bestrahlungsstärke vor. Daraus wurden im weiteren Verlauf die Irradiance Reflectance der Bodenproben und die Remote Sensing Reflectance der Überwassermessungen berechnet.

Berechnung der Irradiance Reflectance der Bodenproben

Die dimensionslose Irradiance Reflectance berechnet sich wie folgt:

$$R(\lambda) = \frac{E_u(\lambda)}{E_d(\lambda)} \text{ [dimensionslos]} \quad (25)$$

wobei $E_u(\lambda = L_u(\lambda) * \pi)$ ist und $E_d(\lambda)$ der Mittelwert der dazugehörigen Referenzmessung. Dabei wird angenommen, dass sich eine Bodenprobe ebenfalls wie ein diffuser Reflektor verhält. So können die Daten der Bodenproben ebenfalls mit π multipliziert werden und daraus, die Irradiance Reflectance berechnet werden. Einzelmessungen mit Sättigungseffekten wurden vor der Berechnung entfernt.

5.4.2 Ramses – Daten

Die Daten der Ramses-Messungen wurden schon während der Datenaufzeichnung von der Software kalibriert und in Strahldichte umgerechnet. Für die weitere Verarbeitung wurden Einzelmessungen mit Sättigungseffekten entfernt. Bei zahlreichen Messungen wurde ein „Totes Pixel“ bemerkt, weshalb die Wellenlänge 404 nm für die weitere Prozessierung ausgeschlossen wurde. Anschließend wurden alle Daten in Remote Sensing Reflectance umgerechnet. Dabei wurden vier verschiedene Rechnungen durchgeführt:

$$R_{rs}^{0+}(\lambda) = \frac{L_u^{0+}(\lambda)}{E_d^{0+}(\lambda)} [\text{sr}^{-1}] \quad (26)$$

$$R_{rs}^{0-}(\lambda) = \frac{L_u^{0-}(\lambda)}{E_d^{0-}(\lambda)} [\text{sr}^{-1}] \quad (27)$$

Die hochgestellten Zeichen stehen für Messungen Überwasser ($0 +$), unter der Wasseroberfläche ($0 -$).

5.4.3 Korrektur und der Reflexionsspektren der Bodenproben

Zur Vorbereitung für die Eingruppierung der Reflexionsspektren der Bodenproben in einzelne Klassen wurden alle Spektren der Proben gesichtet und einzeln auf Anomalien untersucht. Jede Messung besteht aus bis zu 30 Einzelmessungen. Daher können Messungen von Seegras, Algen und Muscheln, die nur lückenhaft die Teichfolie bedeckten, einzelne Spektren beinhalten, die von der Teichfolie stammen oder eine Mischung zwischen Folie und Probe, bzw. verschiedener Proben, darstellen (Abbildung 13, links). Bei Sand- und Sedimentproben können Spiegelungen des Himmels und der Wolken auf einem auf der Probe befindlichen Wasserfilm, einzelne Muscheln oder Teile von Vegetation zu abweichenden Einzelmessungen führen. Daher wurden diese einzelnen Messungen, die aus genannten Gründen Anomalien aufwiesen, unter Berücksichtigung der dazugehörigen Fotos und Kommentaren entfernt. In Abbildung 13 ist rechts oben eine Reflexion vor, darunter nach der Korrektur einer Seegrasmessung dargestellt.

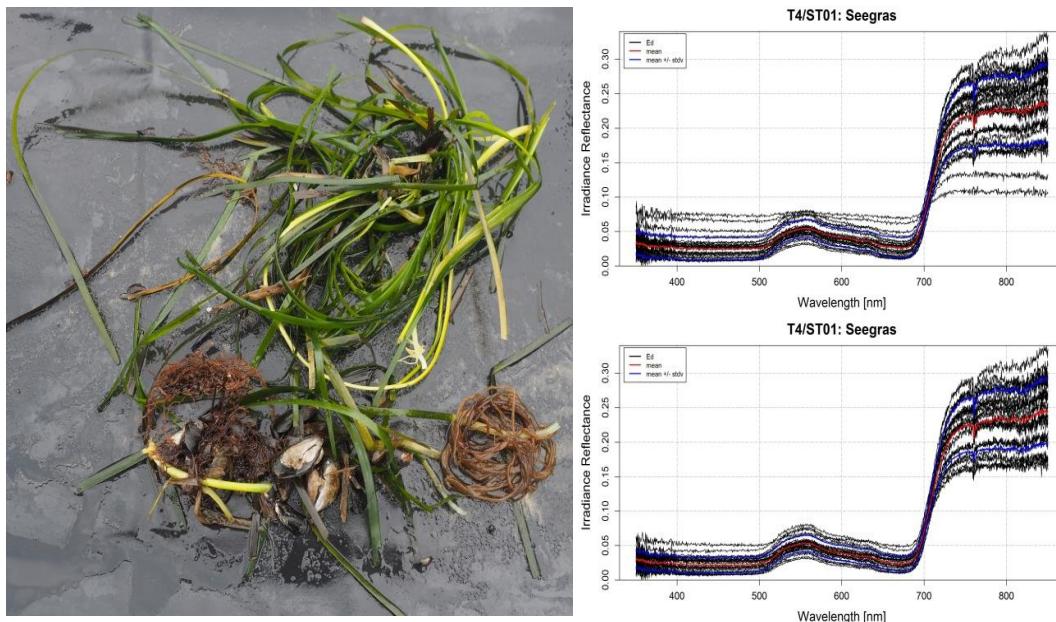


Abbildung 13: Korrektur von Anomalien der Einzelmessungen

Quelle: eigenes Foto, eigene Darstellung

5.4.4 Klassifizierung der Reflexionsspektren

Die korrigierten Reflexionsspektren wurden für die Erstellung der Datenbank anhand ihres spektralen Verlaufs, Fotos und Kommentaren in die Klassen: Gewöhnliches Seegras (*Zostera marina*), Stacheltang (*Desmarestia aculeata*), Blutroter Seeampfer (*Delesseria sanguinea*), Gemeine Miesmuschel (*Mytilus edulis*), Sand, Schlick und Ton eingruppiert. Dabei wurden ausschließlich die Daten mit guter Qualität verwendet. Da auch bei gutem Wetter Strahlungsänderungen durch einzelne Wolken auftraten, führten Schatteneffekte während der Messungen zu Änderung der Reflexionsintensitäten der Spektren. Das erschwerte den Vergleich des Spektralverlaufs. Deshalb wurden alle Spektren auf die Wellenlänge 680 nm anhand folgender Formel normiert:

$$R^N(\lambda) = \frac{R^N(\lambda)}{R^N(680)} \quad (28)$$

Auf diese Weise wurden Messungen mit abweichendem spektralem Verlauf ausgeschlossen und die Klassen *Zostera marina*, *Mytilus edulis*, Sand und Schlick jeweils in zwei weitere Unterklassen unterteilt (siehe Kapitel 6.1). Die weiteren Berechnungen erfordern für jede Klasse ein repräsentatives Reflexionsspektrum, dieses stellt der Mittelwert jeder Klasse dar.

5.4.5 Aufbereitung des mittleren Reflexionsspektrums der einzelnen Klassen für die Implementierung in WASI

Für die Implementierung in die Software WASI mussten die Mittelwerte der Klassen geglättet werden. Die Zacken der Spektren im Bereich nach 760 nm sind einem Peak der Sauerstoffabsorption zwischen 760-765 nm und mehrerer Absorptionsbanden des Wasserdampfs zwischen 810-830 nm geschuldet und wurden korrigiert. Unebenheiten von 350-400 resultieren aus dem Rauschen des Sensors und wurden ebenfalls bereinigt. Dazu wurden die Wellenlängen mit den bekannten Artefakten entfernt und die Daten anschließend linear interpoliert. Im weiteren Verlauf wurden diese Mittelwerte in WASI mit einem Gauß-Filter geglättet. Dieses Verfahren vergrößert die FWHM und mindert dadurch die Auflösung. Um einen guten Kompromiss zwischen niedrigem Rauschen und hoher spektraler Auflösung zu finden, wurden die gemittelten Reflexionsspektren jeder Klasse mit 20 Gauß-Filtern von 1-20 FWHM geglättet. Um den optimalen Gauß-Filter zu finden, wurde für jedes Ausgangsspektrum sowie für die 20 daraus erzeugten geglätteten Spektren die erste Ableitung gebildet. Diese nimmt an der Stelle der Funktion (in diesem Fall: mittleres Reflexionsspektrum) den Wert „Null“ an, wenn sich dort ein Extremwert (Tiefpunkt, bzw. Hochpunkt) befindet. Die erste Ableitung (Abbildung 14) des Originalspektrums (schwarz) der *Desmarestia aculeata* zeigt deutliche Zacken, welche mit zunehmender FWHM immer geringer ausgeprägt sind.

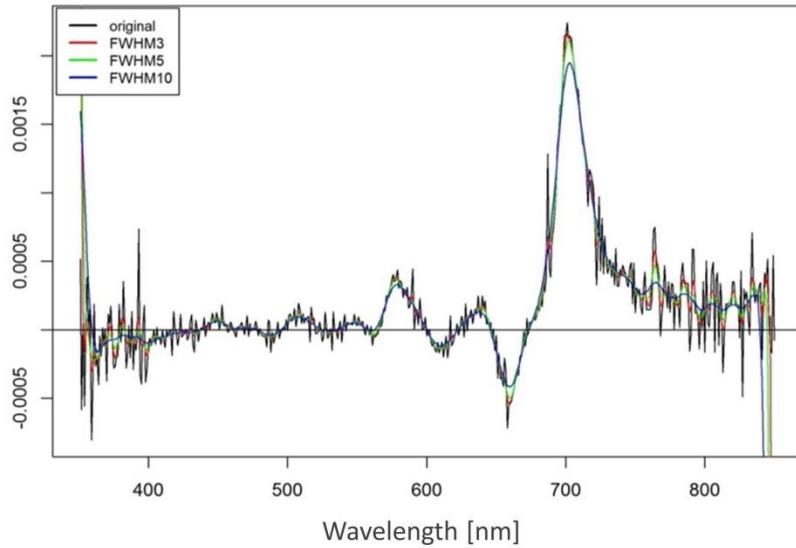


Abbildung 14: Erste Ableitung unterschiedlicher Gauß-Filter

Quelle: eigene Darstellung

Ohne eine Glättung hätte das mittlere Reflexionsspektrum, wie in Abbildung 13 links zu sehen, deutlich mehr Extremwerte (vertikale Linien) wie nach der Glättung mit FWHM5 (rechts).

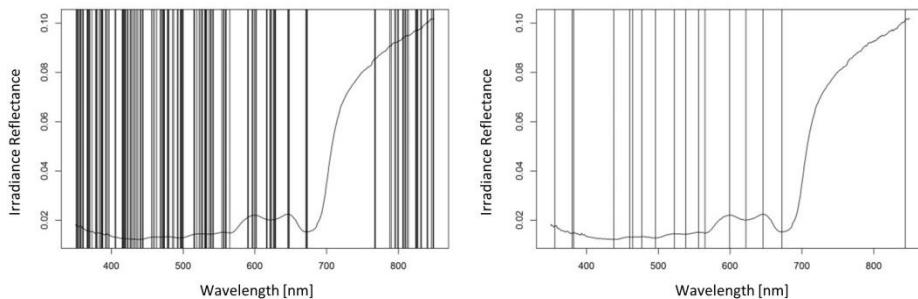


Abbildung 15: Vergleich der Extremwerte des ungeglätteten und des geglätteten Spektrums

Quelle: eigene Darstellung

Mit dieser Methode wurde für jedes gemittelte Reflexionsspektrum der kleinste mögliche Filter gewählt, der das Spektrum ausreichend glättet. Da durch die Bildung des Mittelwertes an sich schon eine gewisse Glättung der Spektren erreicht wurde, konnten jene Spektren, die aus umfangreichen in-situ Messungen resultieren, mit einer geringeren FWHM geglättet werden. Einige Spektren mussten im Bereich bis 350-400 nm und 750-850 nm stärker geglättet werden als im Wellenlängenbereich dazwischen (siehe Kapitel 6.1).

5.5 Ableitung der Wassertiefe mit WASI

Die gemessenen Bodenreflexionsspektren wurden für eine Datenbank aufbereitet und in WASI implementiert. Zur Überprüfung des Einflusses der Spektren der Datenbank auf die Bestimmung der Wassertiefe wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

5.5.1 Ableitung der Wassertiefe aus simulierten Reflexionsspektren

Um den Einfluss der Bodenreflexion auf die Bestimmung der Wassertiefe zu überprüfen, wurden Unterwasserreflexionsspektren mit 100%-igen Bedeckungsgraden jedes Reflexionsspektrums der Datenbank bei verschiedenen Wassertiefen simuliert. Diese wurden im nächsten Schritt wieder invertiert. Ziel dieser Sensitivitätsanalyse war es herauszufinden, inwieweit das Programm die Untergründe erkennen kann und wie diese die Bestimmung der Wassertiefe beeinflussen.

Für die Simulationen wurden die Mittelwerte der Wasserprobenuntersuchung (Kapitel 6.3) verwendet: $C[0] = 1,42 \mu\text{g/l}$, $C[1]-C[5] = 0$, $C_X = 0.48 \text{ mg/l}$, $C_Y = 0,2460 \frac{1}{m}$, $S = 0.01831 \frac{1}{nm}$, für die weiteren Parameter, bis auf die Temperatur $T_W = 10^\circ$ und Sensor-

Tiefe $z = 0.5 \text{ m}$ wurden die Voreinstellungen des Programms behalten. Eine Erklärung der Symbole befindet sich in Tabelle 1. Mit dieser Einstellung wurden Unterwasserreflexionsspektren mit unterschiedlichen Kombinationen der Zusammensetzung des Untergrunds in einem Bereich von 0.5-10 m in einem Abstand von 0.5 m simuliert. Die generierten Daten-Sets sind in Tabelle 3 aufgelistet. Als Grundeinstellung (im weiteren Verlauf als „Hauptspektren“ (HP) bezeichnet) wurden gewählt: $fA[0] = \text{const.}$ $fA[1] = \text{Sand-1}$, $fA[2] = \text{Schlick-hell}$, $fA[3] = \text{Desmarestia aculeata}$, $fA[4] = \text{Zostera marina-1}$ und $fA[5] = \text{Mytilus edulis-1}$ (Kapitel 6.1). Alle Fits in dieser Arbeit wurden in einem Wellenlängenbereich von 400-725 nm durchgeführt.

Tabelle 3: Daten-Sets der simulierten Spektren

Name_Set	fA [1]	fA[2]	fA[3]	fA [4]	fA [5]	Information
Sand-1	1	0	0	0	0	HP
Schlick-hell	0	1	0	0	0	HP
Des. Aculeata	0	0	1	0	0	HP
Zost. Ma.-1	0	0	0	1	0	HP
My. Edu. -1	0	0	0	0	1	HP
My .Edu. -2	0	0	0	0	1	HP, fA[5] = Mytilus-edulis-2
Dele. San.	0	0	1	0	0	HP, fA[3] = Delessaria sanguinea
Sand-2	1	0	0	0	0	HP, fA[1] = Sand-2
Schlick-dunkel	0	1	0	0	0	HP, fA[2] = Schlick dunkel
Ton	0	1	0	0	0	HP, fA[2] = Ton
Zost. Ma. -2	0	0	0	1	0	HP, fA[4] = Zostera marina-2

Bei der Inversion wurden alle Wasserparameter und die Sensorstiefe konstant gehalten fA[0]-fA[5], sowie die Wassertiefe gefittet. Die Startwerte und Grenzen der Parameter sind in Tabelle 4 aufgelistet und wurden für alle weiteren Inversionen in dieser Arbeit verwendet. Als Startwert wurde dabei der Mittelwert und für die Grenzen der die Minima und Maxima der Wasserprobenuntersuchung verwendet.

Tabelle 4: Startwerte und Grenzen für die Inversion

Fit-Parameter	Start	Min	Max
C[0]	1,42	0,8	2,1
C_X	0,48	0,2	0,7
C_Y	0,246	0,220	0,280
S	0,01831	0,01797	0,01855
fA[0]	0,167	0	3
fA[1]	0,167	0	3
fA[2]	0,167	0	3
fA[3]	0,167	0	3
fA[4]	0,167	0	3
fA[5]	0,167	0	3
zB	0	0	20
z*	0.53	0.35	1.21

*die Sensorstiefe wurde bei den Simulationen konstant gehalten.

5.5.2 Ableitung der Wassertiefen anhand ausgewählter Messungen

Anschließend wurden die Untergründe an in-situ Daten ausgewählter Stationen getestet. Dabei wurden die Stationen gewählt, an denen das Wetter gut, der Untergrund sichtbar und Ergebnisse der Wasserprobenuntersuchung vorhanden waren. Dafür waren die Stationen T4-04, T4-06, T2-05_2 geeignet. Für die Inversion wurden die für jede Station der Mittelwert der Ramses-Messung unterhalb der Wasseroberfläche eingelesen und die gemessenen Parameter Chlorophyll-a (bei C[0]), C_X, C_Y, S sowie die Sensorstiefe eingegeben und die Wassertiefe sowie die einzelnen Untergründe (Startwerte und Grenzen siehe Tabelle 4) abgeleitet. Als die Untergründe wurden die Hauptspektren gewählt. Darauf folgte ein weiterer Fit der Messung, für den die Wasserparameter C[0], C_X, C_Y und S sowie Sensorstiefe mitgefittet wurden, um zu vergleichen inwieweit die Unsicherheit der der Wasserparameter das Ergebnis beeinflusst. Zusätzlich wurde beobachtet, wie gut die Untergründe von WASI erkannt werden konnten. Da bei Station T2-05_2 der Untergrund mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit rein Sand war, wurde dort überprüft wie sich die Änderung der Starparameter und eine manuelle Anpassung der Bodenbedeckung auswirken. Außerdem wurde geprüft, wie sich der abgeleitete Wert für die Wassertiefe verändert, wenn der Untergrund Sand nicht berücksichtigt wird. Eine genaue Beschreibung der Vorgehensweise steht zur Übersicht beim Ergebnis (Kapitel 6.5.).

5.5.3 Ableitung der Wassertiefe aus in-situ Unterwasserreflexionsspektren

Da die Reflexionsmessungen über Wasser stark durch das wechselhafte Wetter und der damit einhergehenden Änderung der Strahlungsintensität der Sonne, sowie Spiegelungen von Wolken an der Wasseroberfläche behaftet waren, wurden die Wassertiefen aus den Unterwasserreflexionsmessungen des Ramses-Systems abgeleitet (Abbildung 16).

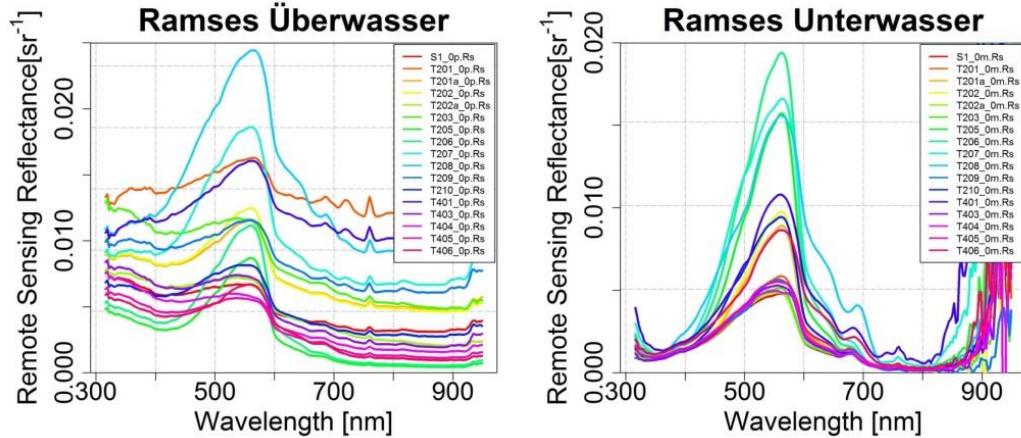


Abbildung 16: Vergleich der Remote Sensing Reflectance Über- und Unterwasser

Die Spektren der Überwassermessungen sind durch Spiegelungen an der Oberfläche deutlich heller und weisen zum Teil einen Anstieg ab 400nm in Richtung kürzerer Wellenlängen auf.

Jede Datei enthält Informationen über den Tag des Jahres, den Sonnenzenithwinkel, die Sensortiefe den mit dem Sonar gemessenen Abstand zum Grund. Für die Ableitung wurden die Parameter anhand der Wasserprobenuntersuchungen wie in Tabelle 4 gewählt.

6 Ergebnisse

Abschließend werden die Ergebnisse der Untersuchungen und der oben genannten Berechnungen, Simulationen und Ableitungen dargestellt.

6.1 Spektrale Datenbank für den Untergrund der Ostsee

Der Untergrund der Ostsee ist sehr heterogen. Dies zeigt sich sowohl in großen Maßstäben, wie beispielsweise durch die Sandbank Lieps als auch auf kleiner Skala im Zentimeterbereich. Um die spezifischen Reflexionen der unterschiedlichen Untergründe bei einer Ableitung der Wassertiefen aus spektralen Messungen berücksichtigen zu können war das vorrangige Ziel dieser Arbeit, eine maßgeschneiderte Spektralbibliothek für die Untergründe der Ostsee zu erstellen.

Als Ergebnis konnten aus den spektralen Vermessungen der Bodenproben (Kapitel 5.3.5) und der in Kapitel 5.4 beschriebenen Datenverarbeitung 11 verschiedene Untergründe mit spezifischen Reflexionen ermittelt werden. Darunter befinden sich *Zostera marina*-1, *Zostera marina*-2 (Gewöhnliches Seegras), *Delessaria sanguina* (Blutroter Seeampfer), *Desmarestia aculeata* (Stacheltang), *Mytilus edulis*-1, *Mytilus edulis*-2 (Gemeine Miesmuschel), Sand-1, Sand-2, Schlick-hell, Schlick-dunkel und Ton.

Das Ergebnis der geglätteten Mittelwerte für die 11 Bodenproben ist in Abbildung 17 dargestellt:

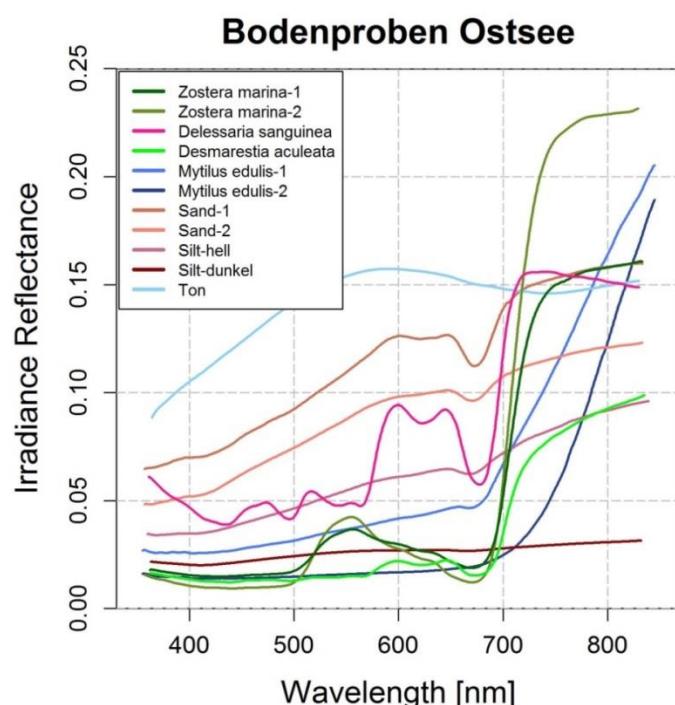


Abbildung 17: Reflexionsspektren für die Datenbank für die Untergründe der Ostsee

Dabei sind die geglätteten Mittelwerte das Resultat der folgenden Ergebnisse:

6.1.1 Gewöhnliches Seegras (*Zostera marina*)

Für das Gewöhnliche Seegras *Zostera marina* (Abbildung 18) wurden zwei repräsentative Reflexionsspektren für die Datenbank ausgewählt: *Zostera marina*-1 und *Zostera marina*-2. Dazu wurden 124 im spektralen Verlauf ähnliche Einzelspektren zusammengefasst, aus den Spektren aus 7 Stationen zusammengefasst.



Abbildung 18: Gewöhnliches Seegras (*Zostera marina*) Unterwasser und an Bord

Da die Spektren bei einer Normierung auf 680 nm eine deutliche Variabilität nach 700 nm aufwiesen (Abbildung 19) wurden die anhand dieses Bereiches in zwei Unterklassen unterteilt (Abbildung 20).

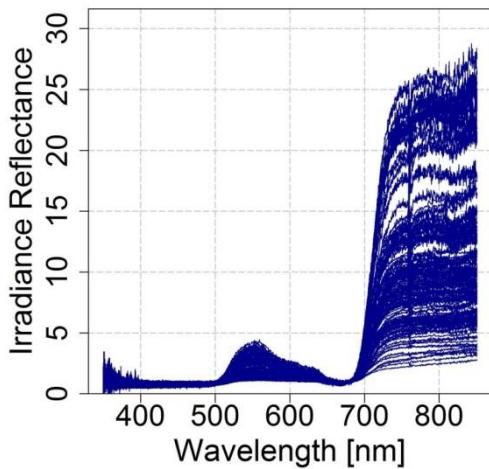


Abbildung 19: *Zostera marina*: 124 Einzelmessungen (normiert auf 680)

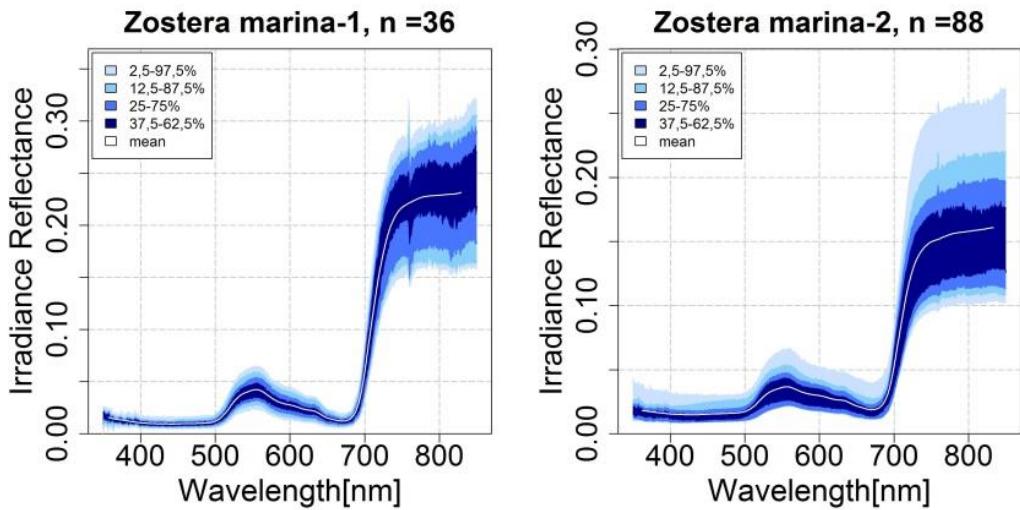


Abbildung 20: Spektren der Zostera marina-1 (links) und Zostera marina-2 (rechts)

Zur Veranschaulichung der Variabilität der Daten wurden sie in Anlehnung an Hochberg et al. (2003) visualisiert. Die farbigen Bereiche repräsentieren von Hellblau nach Dunkelblau folgende Datengrenzen: 2,5-97,5% bedeutet 95% aller Daten liegen innerhalb dieses Bereichs, 12,5-87,5% = 75%, 25-75% = 50%, 37,5-62,5% = 25%. Die weiße Linie ist der geglättete Mittelwert und der Buchstabe „n“ steht für die Anzahl der einzelnen Spektren.

Die Reflexionsspektren des Gewöhnlichen Seegrases, zeichnen sich durch einen Anstieg ab 500 nm aus, auf den ein Maximum bei 555 nm folgt. Das Spektrum fällt anschließend, bis auf eine kleinen Hügel bei 635 nm, wieder ab und steigt nach einem Tal bei 670-680 (Chlorophyll-a Absorption) stark an.

Zostera marina-1:

Für den geglätteten Mittelwert wurden folgende Wellenlängen entfernt: nm = 351, 353-354, 356-360, 362-372, 375-388, 393-398, 719, 722, 758-795, 815-818, 820, 822-823 und die Daten interpoliert. Für den Wellenlängenbereich von 350 bis 708 nm wurde ein Gauß-Filter mit 9 FWHM und für 709-850 nm mit 18 FWHM verwendet.

Zostera marina-2:

Die Glättung des Mittelwertes erfolgte durch die Entfernung derselben Wellenlängen wie bei Zostera-marina-1 und einer anschließenden Interpolation. Für den Wellenlängenbereich von 350 bis 451 nm wurde ein Gauß-Filter mit 15 FWHM, für 452-769 9 FWHM und von 770-850 13 FWHM verwendet.

6.1.2 Stacheltang (*Desmarestia aculeata*)



Abbildung 21: Stacheltang (*Desmarestia aculeata*)

Das Spektrum des Stacheltangs (*Desmarestia aculeata*) (Abbildung 21) ist das Ergebnis aus 173 Einzelmessungen aus 6 Messungen.

Der geglättete Mittelwert ist das Ergebnis einer Interpolation nach der Entfernung der gleichen Wellenlängen wie bei *Zostera-marina-1* und der Verwendung eines Gaußfilters mit 13 FWHM für Wellenlängenbereich von 350-406 nm, 5 FWHM für 407-754 nm und 13 FWHM bei 755-850 nm.

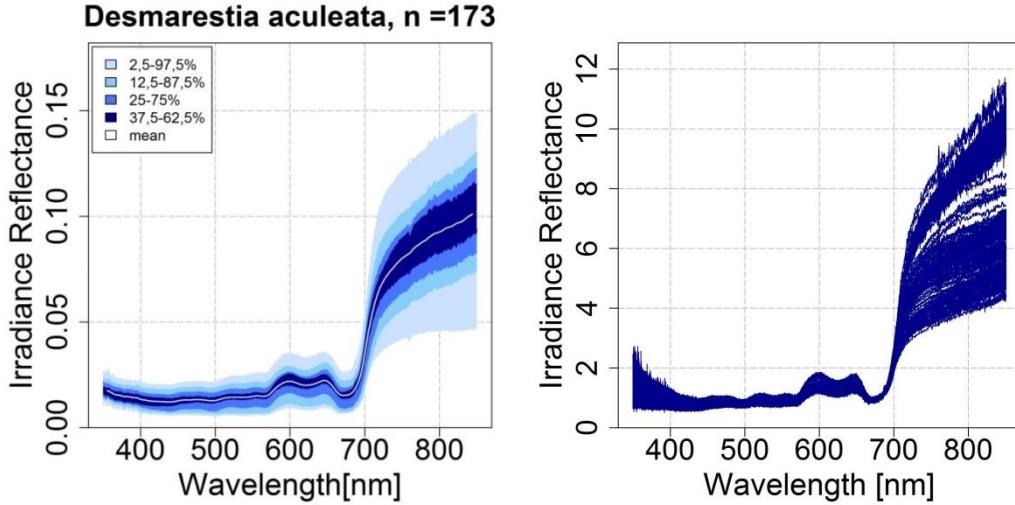


Abbildung 22: Spektren der *Desmarestia aculeata* (links), normiert auf 680 nm (rechts)

Das Reflexionsspektrum des Stacheltangs ist im Vergleich zu dem des Gewöhnlichen Seegrases insgesamt dunkler und weist zwei Maxima (600 und 650nm) und steigt nach einer Mulde bei 670nm stark an. Außerdem befinden sich drei kleine schwache Täler bei 440, 500 und 570 nm.

6.1.3 Blutroter Seeampfer (*Delessaria sanguinea*)



Abbildung 23: Blutroter Seeampfer (*Delessaria sanguinea*)

Das Spektrum des Blutroten Seeampfers (*Delessaria sanguinea*) (Abbildung 23) ist das Ergebnis aus 30 Einzelmessungen aus einer Messung.

Für den geglätteten Mittelwert wurden folgende Wellenlängen entfernt: 758-764, 785-787, 791, 793-794, 812-818, 822-823 und die Daten interpoliert. Für Wellenlängenbereich von 350 - 393 nm wurde ein Gauß-Filter mit 9 FWHM, für 394-723 3 FWHM und von 724-850 9 FWHM verwendet.

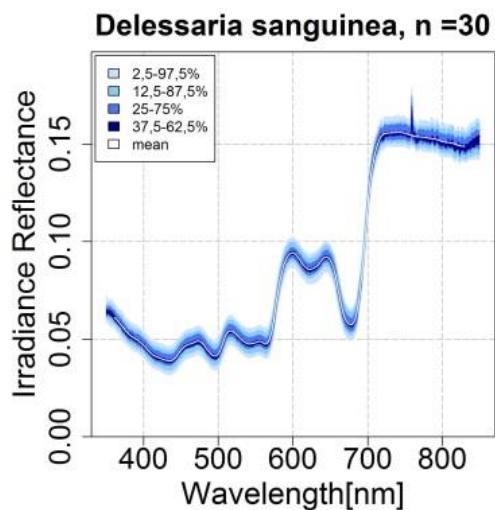


Abbildung 24: Spektren der *Delessaria sanguinea*

6.1.4 Gemeine Miesmuschel (*Mytilus edulis*)



Abbildung 25: Gemeine Miessmuschel (*Mytilus edulis*)

Hier wurden zwei unterschiedliche spektrale Verläufe der Reflexionsspektren erkannt. Anhand von Bildern und Kommentaren wurde jedes Spektrum der Gemeinen Miesmuschel (Abbildung 25) zugeordnet. Die Muscheln unterschieden sich hinsichtlich ihrer Farben. Dabei war der große Teil schwarz, während andere bräunlich gefärbt waren. Aus den Kommentaren und Bildern konnte nicht eindeutig geklärt werden, welche Farbe zu welchem Spektrum gehört, weshalb beide Spektren übernommen wurden (Abbildung 26). Ein Spektrum (*Mytilus edulis*-1) ist gekennzeichnet durch einen leichten Anstieg bis auf 650 nm, einer darauffolgenden Mulde (eventuell Chlorophyll-a aus Algenfilm auf der Muschel) und einem anschließenden geraden und steilen Anstieg bis 850 nm. Das zweite Spektrum (*Mytilus edulis*-2) weist einen geringeren Anstieg bis 650 nm auf, und steigt ab dort steil und gekrümmmt bis auf 850 nm an. Ein Absorptionsmerkmal von Chlorophyll-a ist nicht vorhanden.

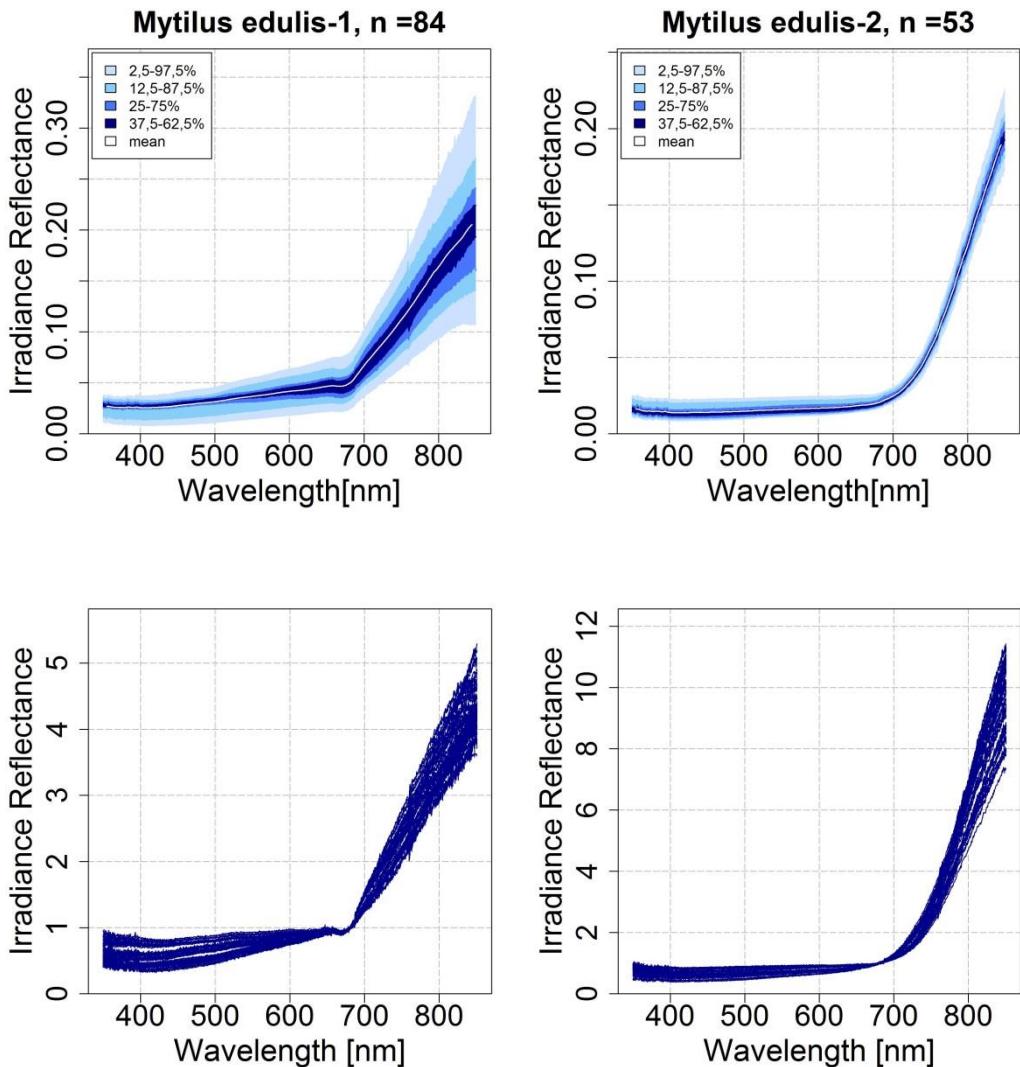


Abbildung 26: Spektren der *Mytilus edulis*-1 (links) und *Mytilus edulis*-2 (rechts)

Mytilus edulis-1 enthält 84 Daten aus 4 Einzelmessungen und *Mytilus edulis*-2 53 Spektren aus 2 Einzelmessungen.

Für den geglätteten Mittelwert wurden für beide Datensätze folgende Wellenlängen entfernt: 758-764, 785-787, 791, 793-794, 815-818, 820, 822-823 und die Daten interpoliert. Für den gesamten Wellenlängenbereich von 350 bis 850 nm wurde ein Gauß-Filter mit 5 FWHM verwendet.

6.1.5 Sand

Die Sand-Reflexionsspektren wurden in zwei Unterklassen unterteilt (Abbildung 27). Diese beiden unterscheiden sich. Sand-1 weist im Vergleich zu Sand-2 zwei ausgeprägte Hügel bei 600 und 650 nm auf. Bei Sand-2 deutet sich ein Hügel bei 600 nm zwar an, ist aber weniger stark ausgeprägt. Für einige Proben, sofern ausreichend Material vorhanden war, wurde eine Korngrößenanalyse an der TU-München durchgeführt.

Für 3 Stationen von Sand-2 (insgesamt 4 Stationen) und für eine Station der 3 Stationen von Sand-2 wurde an der Technischen Universität München eine Korngrößenanalyse durchgeführt. Bei allen handelt es sich um Reinsande, jedoch mit unterschiedlicher Größe der Sandkörner. Bei einer Korngrößenanalyse liegen die Korngrößen für reinen Sand bei 2mm-63µm. Vermutlich liegt Sand-1 dort im Bereich der oberen Grenze und Sand-2 im Bereich der unteren (Abbildung 27)



Abbildung 27: Sand-1 (links), Sand-2 (rechts)

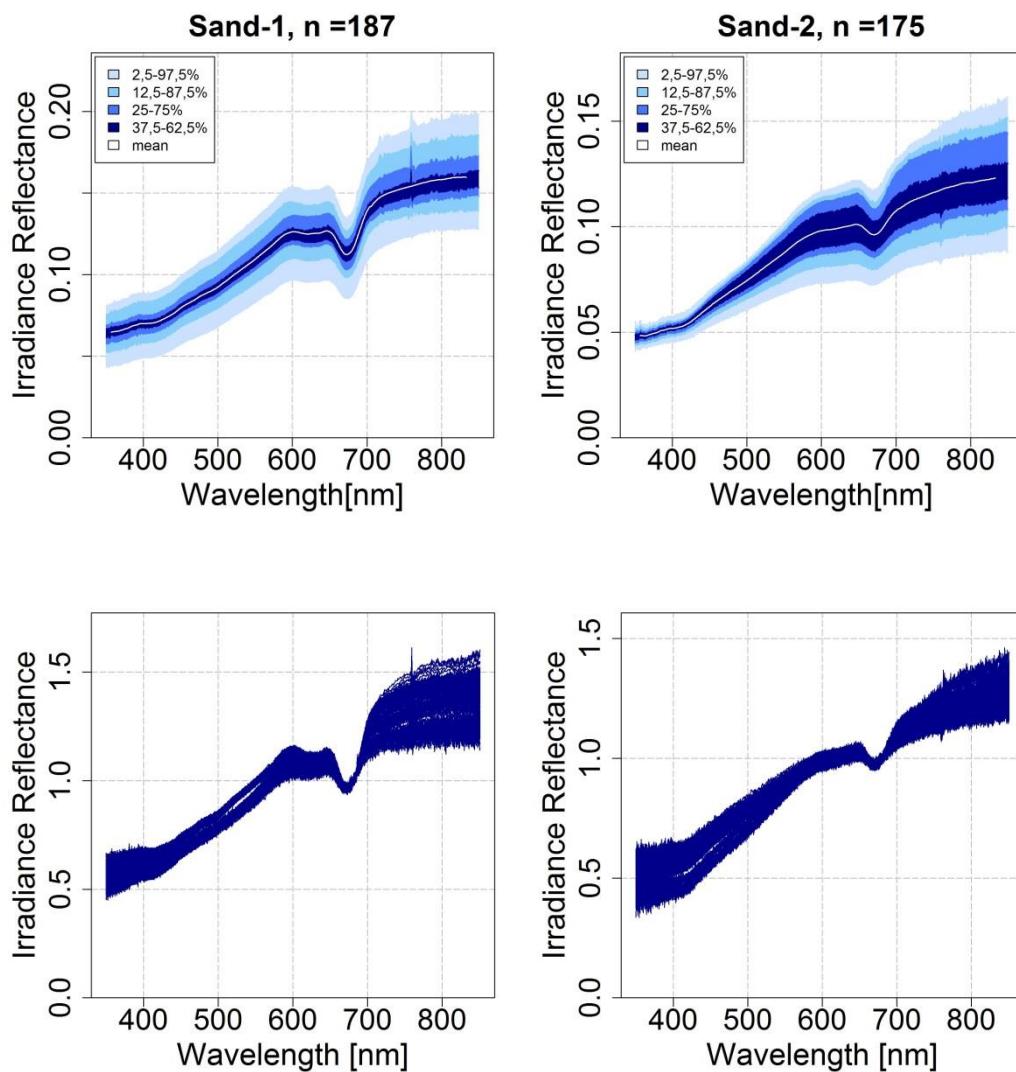


Abbildung 28: Spektren Sand-1 (links), Sand-2 (rechts), unten normiert auf 680 nm

Sand-1 ist das Ergebnis aus 187 Einzelmessungen aus 9 Messungen und Sand-2 aus 175 Einzelmessungen aus 6 Messungen.

Für den geglätteten Mittelwert wurden bei beiden Datensätzen folgende Wellenlängen entfernt: 758-764, 785-787, 791, 793-794, 815-818, 820, 822-823 und die Daten interpoliert. Für den Wellenlängenbereich von 350-704 nm wurde ein Gauß-Filter mit 5 FWHM und für 705-850 nm mit 15 FWHM verwendet.

6.1.6 Schlick

An drei Stationen wurden Sedimentproben hervorgeholt: ST1, T202a (kein Foto) und T402. Diese wurden anhand von den Fotos (falls nicht vorhanden anhand der Kommentaren) in helles und dunkles Sediment unterteilt. Dabei wurde helles Sediment an der Station ST1 und T402 vermessen und dunkles an der ST1 und T202a. Die Proben sind in Abbildung 29 zu sehen. Die Korngrößenanalyse für das helle Sediment ergab „lehmiger Sand“ und die für das dunkle „stark sandiger Lehm“ bis „schluffiger Lehm“.



Abbildung 29: Schlick der Station ST1 (links) (mit hellem und dunklem Anteil), Schlick der Station T402 (rechts) (nur heller Anteil)

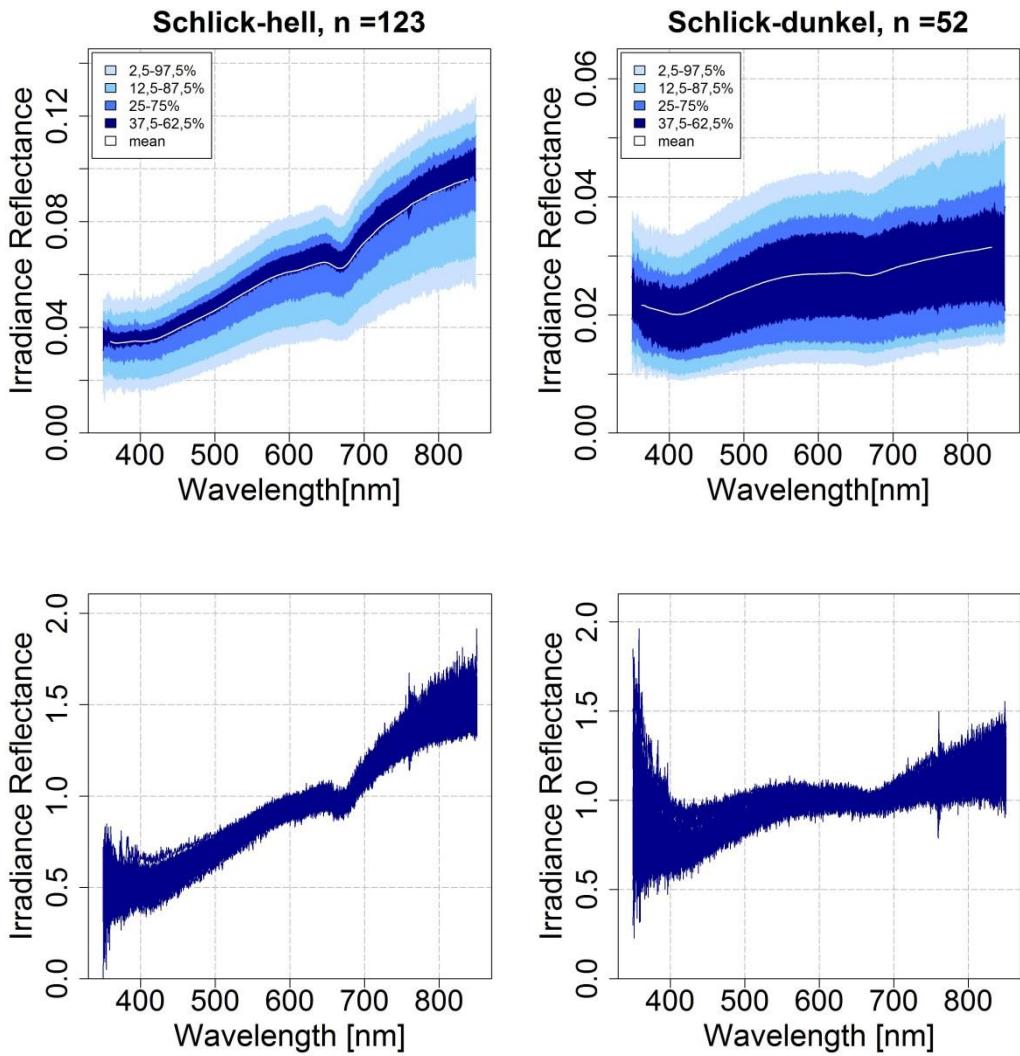


Abbildung 30: Spektren Schlick-hell (links) und Schlick-dunkel(rechts), unten normiert auf 680 nm

Schlick-hell ist das Ergebnis aus 123 Einzelmessungen aus 9 Messungen und Schlick-dunkel aus 52 Einzelmessungen aus 5 Messungen.

Für den geglätteten Mittelwert wurden folgende Wellenlängen entfernt: 758-764, 785-787, 791, 793-794, 815-818, 820, 822-823 und die Daten interpoliert. Für den gesamten Wellenlängenbereich von 350-850 nm wurde für Sediment-hell ein Gauß-Filter mit 10 FWHM verwendet und für Sediment-dunkel ein Gauß-Filter von 15 FWHM.

6.1.7 Ton



Abbildung 31: Ton

Das Spektrum für Ton ist das Ergebnis aus 23 Einzelmessungen einer Messung.

Der Mittelwert wurde durch Interpolation nach Entfernung folgender Wellenlängen geglättet: 758-764, 785-787, 791, 793-794, 815-818, 820, 822-823. Für den gesamten Wellenlängenbereich von 350 bis 850 nm wurde ein Gauß-Filter mit 17 FWHM verwendet.

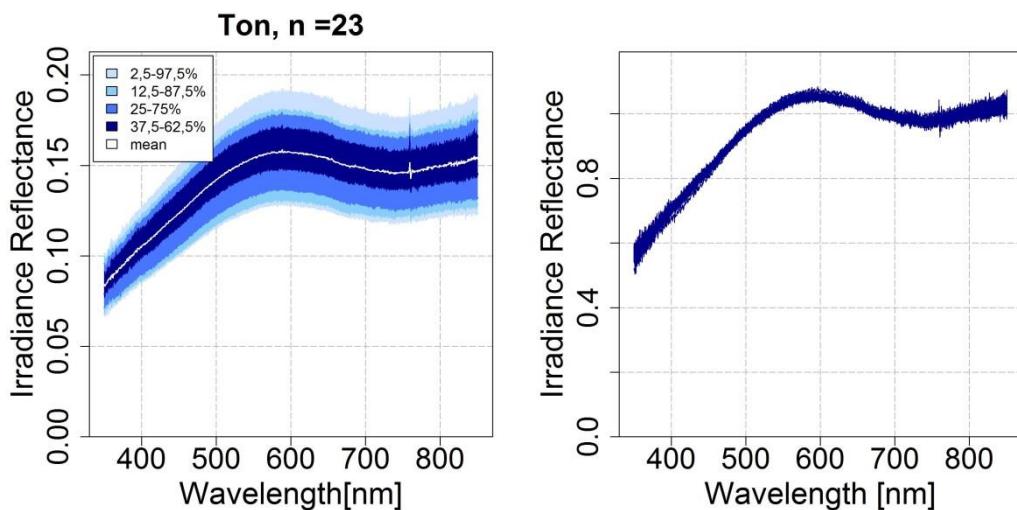


Abbildung 32: Spektren des Tons (links), interpoliert auf 680 nm (rechts)

6.2 Vergleich von in-situ Ergebnissen mit Reflexionsspektren aus dem Labor

Um die in-situ Reflexionen der Untergründe der Ostsee zu verifizieren wurden die entsprechend zusammengehörigen Messungen, welche aus den Ibsen-Daten berechnet wurden, mit den Messungen im Labor verglichen. Die Messungen im Labor wurden, wie bereits erwähnt, bei verschiedenen Sättigungsgraden der Bodenprobe mit Wasser durchgeführt. Der Abstand zwischen Zeitpunkt 0 (gesättigt) und Zeitpunkt 1 betrug 120 Minuten. Auf dem Schiff lagen die Proben höchstens 30 Minuten an Luft, bevor die Messung erfolgte, weshalb die in-situ Messungen mit denen der gesättigten Probe verglichen wurden. Abbildung 33 zeigt das Ergebnis ausgewählter Messungen bei günstigeren Wetterbedingungen. Die durchgezogenen Linien zeigen die Reflexionsmessungen des Ibsen auf dem Schiff, die gestrichelten Linien die des ASD im Labor. Zusammengehörige Messungen sind durch gleiche Farben gekennzeichnet.

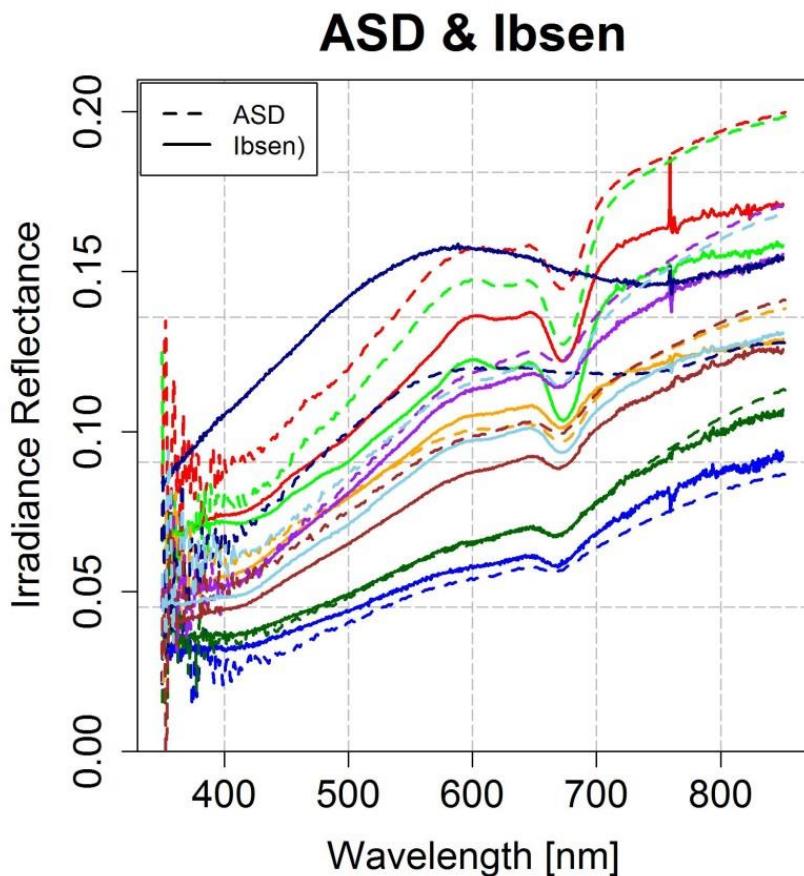


Abbildung 33: Vergleich von Reflexionsmessungen im Feld (Ibsen) mit und im Labor (ASD)

Bis auf kleine Abweichungen ab 750 nm der unteren beiden Spektren (grün und blau) stimmen die Messungen spektralen Verlauf gut überein. Dies zeigt, dass trotz der wechselhaften Wetterbedingungen brauchbare und plausible in-situ Daten gesammelt werden konnten.

6.3 Ergebnisse der Wasserprobenuntersuchung

Vom Helmholtz Zentrum in Geesthacht wurden 10 Wasserproben auf Schwebstoffgehalt, Konzentration von Chlorophyll a und Gelbstoffabsorption untersucht.

6.3.1 Schwebstoff und Chlorophyll a

Die 10 gewonnenen Wasserproben wurden auf den Gehalt von Schwebstoff (Total Suspended Matter, TSM), unterschieden in anorganisch (ISM) und organisch (OSM), in mg/l untersucht (Tabelle 5), OSM% gibt dabei den Prozentanteil der organischen Schwebstoffe am gesamten Schwebstoff an. Die gesamte Chlorophyll a Konzentration ist in µg/l angegeben.

Zum Zeitpunkt der Kampagne lag der Schwebstoffgehalt des Testgebiets im Mittel bei 0,48 mg/l, welcher mit Ausnahme der Station T2-02 immer vom Anteil des organischen Schwebstoffs dominiert war. Die Anteile reichen von 49,81% (T2-02) bis 97,45% (T2-05) und liegen im Mittel bei 80,02%. Die Konzentration von Chlorophyll a lag zwischen 0,850 und 2,083 µg/l und durchschnittlich bei 1,42 µg/l. Alle Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 5 aufgelistet:

Tabelle 5: Ergebnisse der Wasserinhaltsstoffe (Wasserprobenuntersuchung HZG)

Probe	TSM [mg/l]	ISM [mg/l]	OSM [mg/l]	OSM %	Chl a total µg/l
St1	0,340	0,076	0,264	77,67	1,504
T2-01	0,605	0,123	0,481	79,58	1,942
T2-02	0,655	0,329	0,336	49,81	2,083
T2-05	0,567	0,083	0,484	85,33	1,326
T4-01	0,212	0,080	0,291	78,56	1,152
T4-04	0,440	0,151	0,289	65,64	1,225
T4-06	0,617	0,102	0,516	83,49	1,555
T2-05	0,425	0,011	0,415	97,45	1,637
T2-08	0,453	0,063	0,389	86,03	0,931
T2-10	0,460	0,015	0,445	96,65	0,850
MW	0,477	0,103	0,390	80,02	1,42
SD	0,130	0,085	0,087	13,357	0,383
MIN	0,212	0,01	0,26	49,81	0,85
MAX	0,655	0,33	0,52	97,45	2,08

6.3.2 Gelbstoff (CDOM)

Von den 20 untersuchten Proben stammen 10 vom Messteam des DLR in Oberpfaffenhofen und 10 vom Messteam des DLR in Berlin. Da sich die Ergebnisse der Gelbstoffabsorptionen der einzelnen Stationen und Teams kaum unterscheiden, wurden die weiteren Berechnungen mit denen aller Wasserproben durchgeführt.

Dazu wurden die spezifischen Gelbstoffabsorptionen der Referenzwellenlänge $\lambda = 440$ nm bestimmt und die Steigung (S) des Absorptionsspektrums anhand folgender Formel ermittelt:

$$a_Y(\lambda) = a_Y(\lambda_0) * e^{(-S(\lambda-\lambda_0))} \quad [m^{-1}] \quad (29)$$

Auf Abbildung 34 ist links die Gelbstoffabsorption aller 20 Wasserproben im Wellenlängenbereich von 280-720 nm abgebildet, und rechts im Wellenlängenbereich ± 50 nm symmetrisch um die Referenzwellenlänge 440 nm, von 390 bis 490 nm.

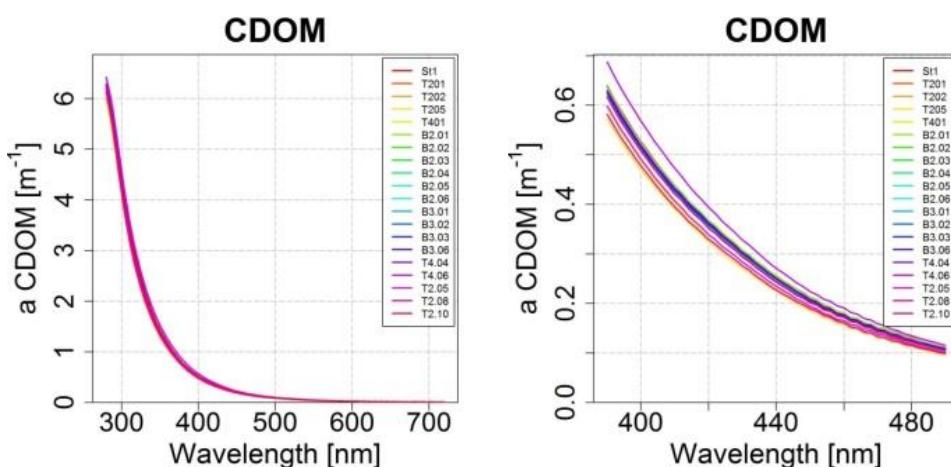


Abbildung 34: Gelbstoffabsorption von 20 Wasserproben

Für die Ableitung der Wassertiefe in WASI ist es wichtig, die Spannbreite des Faktors S und der spezifischen Gelbstoffabsorption der einzelnen Wasserproben zu kennen. Deshalb wurde die Steigung jeder einzelnen Probe ermittelt. Die Ergebnisse der Gelbstoffabsorptionsuntersuchung sind in (Tabelle 6) aufgelistet:

Tabelle 6: Werte der Gelbstoffabsorption

Parameter	Wert
$a_{CDOM} [m^{-1}](440 \text{ nm}) \text{ MW}$	0.2461
$a_{CDOM} [m^{-1}](440 \text{ nm}) \text{ MIN}$	0.2244
$a_{CDOM} [m^{-1}](440 \text{ nm}) \text{ MAX}$	0.2710
$S [nm^{-1}] \text{ MW}$	0.01831
$S [nm^{-1}] \text{ MIN}$	0.01797
$S \text{ MAX}$	0.01855

Die Minima und Maxima wurden im Weiteren in WASI als Grenzen, und die Mittelwerte als Startparameter verwendet.

6.4 Ableitung der Wassertiefe aus simulierten Daten mit bekanntem Untergrund

Die Ergebnisse der Ableitung der Wassertiefe aus simulierten Daten, mit bekanntem Untergrund zeigt Abbildung 35. Dazu ist die simulierte in x-Richtung und die abgeleitete Wassertiefe in y-Richtung aufgetragen. Die schwarze Linie stellt die 1:1 zwischen simulierter und abgeleiteter Tiefe dar.

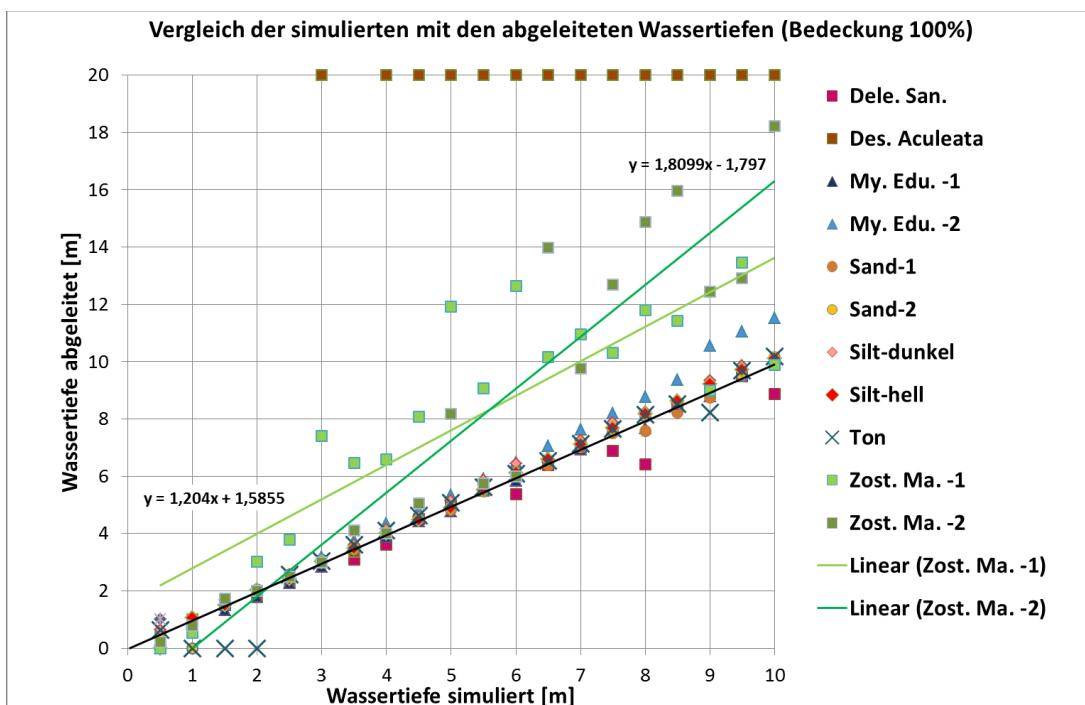


Abbildung 35: Vergleich der simulierten mit den abgeleiteten Wassertiefen (Bedeckung 100%)

Die Abbildung zeigt, dass aus den simulierten Daten die Wassertiefe für den Großteil der Untergründe sehr gut abgeleitet werden konnte (Sand, Schlick, Ton, Gemeine Miesmuschel (*Mytilus-edulis-1*), Blutroter Seeampfer (*Delessaria sanguinea*)). Bei einer vollständigen Bedeckung der *Mytilus edulis-2* wurde die Wassertiefe im Mittel um 17,2% zu tief abgeleitet (Regressionsgerade: $y = 1,1746x - 0,4155$) und war bis zu einer Tiefe von 6 Metern genau. Die beiden Seagrasspektren führten zu einer Überschätzung der Wassertiefe von bis zu 114,9% (*Zostera marina-1*) und bis zu 87,7% (*Zostera marina-2*). Bis zwei meter funktioniert die Inversion bis 2 Meter auf 38 cm \pm 13 cm. von Eine 100%-ige Bedeckung mit Stacheltang (*Desmarestia aculeata*) ergab einen sehr großen Fehler der Wassertiefe. Dabei wurde ab einer Tiefe von 3 Metern die Wassertiefe auf über 20 Meter abgeleitet (20 Meter ist die Grenze des Fitparameters Wassertiefe, zB). Die

mittlere absolute Differenz von der simulierten Wassertiefe so wie die dazugehörigen Mittelwertabweichungen sind in Tabelle 7 dargestellt:

Tabelle 7: Genauigkeit der Inversion

Untergrund	Mittlere Differenz [m]	MW-abweichung [m]
Dele. San.	0,27	0,33
Des. Aculeata	9,36	5,50
My. Edu. -1	0,15	0,08
My. Edu. -2	0,56	0,37
Sand-1	0,16	0,17
Sand-2	0,09	0,10
Schlick-dunkel	0,17	0,12
Schlick-hell	0,11	0,08
Ton	0,35	0,39
Zost. Ma. -1	2,76	1,60
Zost. Ma. -2	2,51	2,54

In Abbildung 36 ist dargestellt, wie gut die Untergründe durch das Programm erkannt worden sind, dazu ist die absolute Abweichung der vom Fit berechneten fA-Werte zum simulierten fA-Wert (1) in Abhängigkeit von der Wassertiefe aufgetragen. Je kleiner der Wert desto besser wurde der Untergrund erkannt, 0 bedeutet keine Erkennung. Im linken oberen Diagramm sind alle Makrophyten, rechts oben beide Muscheln, links unten Sande und rechts unten Schlick und Ton dargestellt. Die Summe der Parameter $fA[i]$ ist im Modell auf das Intervall 0,5 bis 2,0 beschränkt. Eine solche Parameterausgabe für eine Bodenreflexion zeigt, dass das Programm kein passendes Untergrundreflexionsspektrum finden konnte und gezwungen war, für eines der Spektren den Wert einer dieser Grenzen zu vergeben. Dies wurde in der Auswertung berücksichtigt.

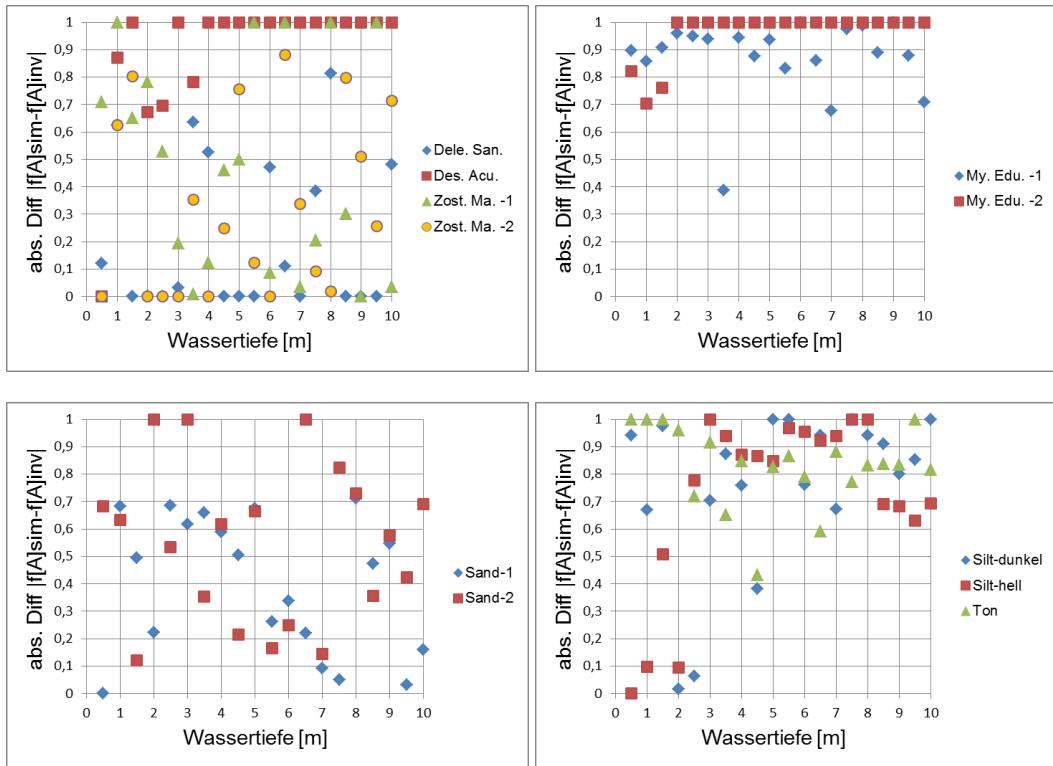


Abbildung 36: Absolute Differenz zwischen simulierte und abgeleitete relativ Anteil des Bodentyps

Es ist zu sehen, dass die Erkennung der Untergründe sehr stark schwankt und sie daher nicht konstant über die Wassertiefe gleich gut erkannt werden. Bei der Betrachtung der von Abbildung 37 der in Verbindung mit Abbildung 36 ist zu erkennen, dass die Ableitung einer korrekten Wassertiefe nicht unbedingt von der Fähigkeit des Programms abhängig ist, die Untergünde zu erkennen. Dies zeigt das Beispiel *Mytilus edulis*-2. WASI hat die Reflexion der Muscheln nicht miteinbezogen, trotzdem konnte die Wassertiefe sehr gut abgeleitet werden. Dies gilt jedoch nicht für Spektren die prinzipiell erkannt werden können, wie die Erkennung der beiden Seegrasspektren veranschaulicht (links oben). Bei einigen Tiefen, an denen WASI die Spektren erkannt hat, lieferte es gute Ergebnisse bei der Inversion. Für das Reflexionsspektrum der *Desmarestia aculeata* kann festgehalten werden, dass WASI den Untergrund bei 1,5 Metern nicht erkannt hat, aber die Wassertiefe trotzdem sehr gut ableiten konnte. Erst ab 3 Metern führte dann ein Scheitern des Algorithmus zu einer sehr hohen Überschätzung der Wassertiefe. Auf den Abbildungen ist außerdem ersichtlich das *Mytilus-edulis*-1 besser erkannt wird als *Mytilus-edulis*-2. Sand-1 besser als Sand-2. *Zostera-marina*-1 wurde nicht so gut entmischt wie *Zostera-marina*-2. Ein Vergleich der Erkennbarkeit der Sandspektren und der Seegrasspektren zeigt, dass beide über die Wassertiefen sehr unterschiedlich erkannt wurden, was bei der Bedeckung von Sand keine Auswirkungen auf die Ableitung der Wassertiefe hervorruft, bei den Seegrasspektren jedoch zu großen Fehlern führte.

6.5 Ableitung der Wassertiefe aus ausgewählten in-situ Daten

Die Ableitung der Wassertiefe erfolgte an den 3 ausgewählten Stationen T2-05_2, T4-04 und T4-06, an denen das Wetter gut die Wassertiefe bekannt und der Boden sichtbar war. Als Bodenreflexionen wurden die Hauptspektren verwendet ($fA[0] = \text{const.}$, $fA[1] = \text{Sand-1}$, $fA[2] = \text{Schlick-hell}$, $fA[3] = \text{Desmarestia aculeata (Blutroter Seeampfer)}$, $fA[4] = \text{Zostera marina-1 (Gewöhnliches Seegras)}$, $fA[5] = \text{Mytilus-edulis-1 (Gemeine Miesmuschel)}$). Die Fits wurden im Wellenlängenbereich von 400-725 nm, mit einer spektralen Auflösung von 1nm durchgeführt.

Für die 3 Stationen wurden folgende Ergebnisse erzielt:

T2_05_2

An dieser Station war das Wetter sonnig mit vereinzelten Zirren der Sensor war im Mittel 0,59 Meter tief im Wasser und der Abstand zum Grund betrug durchschnittlich 5,15 Meter. Die Wassertiefe bei den Messungen mit dem Ramses-System beträgt daher im Schnitt 5,74 m. Der Sonnenzenithwinkel betrug 44.38° . Die Bilder der Unterwasserkamera zeigten ausschließlich einen sandigen homogenen Untergrund (Abbildung 37). Dies wurde auch für die Messung unterhalb der Wasseroberfläche angenommen weshalb dort einige Tests durchgeführt werden konnten.

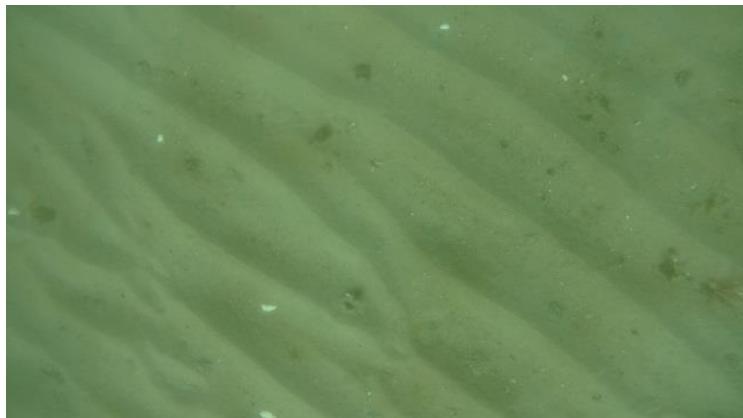


Abbildung 37: Unterwasserfoto der Station T2-05_2

Quelle: Foto Unterwasserkamera

Für Station T2-05_2 wurden 5 Fits durchgeführt und dazu folgende Einstellungen vorgenommen:

fit_1:

Fitparameter: zB, $fA[0]$ - $fA[5]$ (Startwerte für alle Fits dieses Kapitels: siehe Tabelle 4), konstante Parameter: Parameter der Wasseruntersuchung ($C[0]$, C_X , C_Y , S), Sensortiefe ($z = 0.59$)

fit_2:

Fitparameter: zB, fA[0]-fA[5], konstante Parameter: konstante Parameter der Wasseruntersuchung (C[0], C_X, C_Y, S), Startwerte der Untergründe geändert auf fA[1] (Sand-1) = 1, alle übrigen = 0

fit_3:

Fitparameter: zB, konstante Parameter: Parameter der Wasseruntersuchung (C_X, C_Y, S), manuelle Anpassung von fA[1] auf 1,40, alle übrigen = 0.

fit_4:

Fitparameter: C[0], C_X, C_Y, S, z, zB, fA[0]-fA[5]

fit_5:

Fitparameter: C[0], C_X, C_Y, S, z, zB, fA[0], fA[3], fA[4], fA[5], Untergründe ausgenommen fA[1] (Sand-1)=0, fA[2] (Sediment-hell)=0

Das gemessene Spektrum (Meas) sowie die Fit-Spektren sind in Abbildung 38 abgebildet.

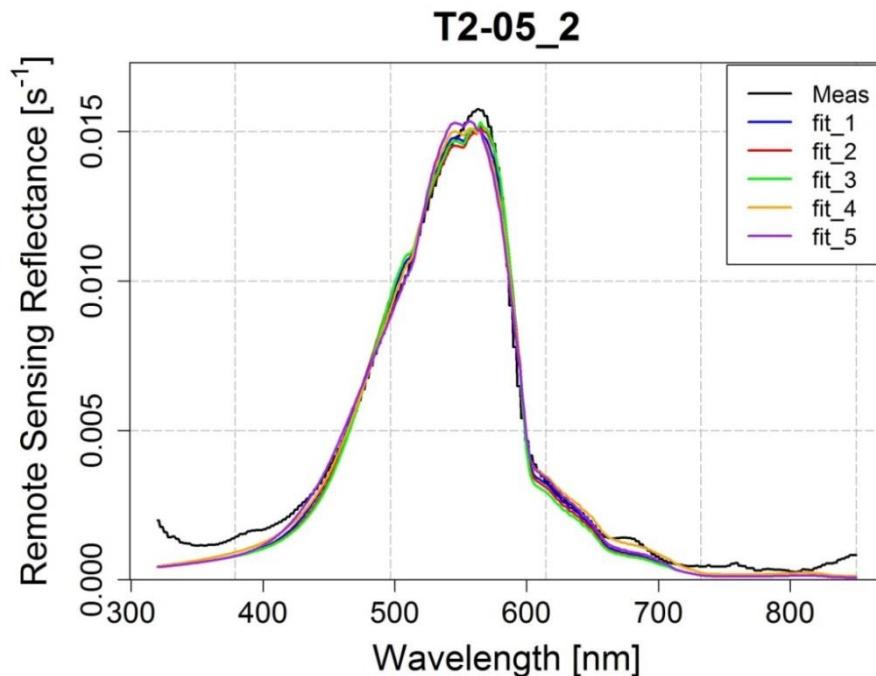


Abbildung 38: Fit-Ergebnisspektren T2-05_2

Quelle: eigene Darstellung

In der Abbildung ist zu sehen, dass das Programm sehr gute Ergebnis-Spektren berechnet hat. Lediglich das Spektrum (fit_5, lila), bei dem für die Inversion die Untergründe Sand-1 und Schlick-hell ausgeschaltet wurden ist eine leichte Abweichung bei ~550 nm zu erkennen. Die Werte der Fit-Parameter fA sind in Tabelle 8 dargestellt:

Tabelle 8: Fit-Ergebnisse der Station T2_05_2 für Wassertiefe und Bedeckungsgrade

	fit_1	fit_1 [%]	fit_2	fit_2 [%]	fit_3	fit_3 [%]	fit_4	fit_4 [%]	fit_5	fit_5 [%]
zB	5,11		5,46		5,71		4,91		4,44	
fA[0]	0,27	13,25	0,00	0,00	0,00	0,00	1,07	53,53	0,59	29,65
fA[1]	0,48	23,90	1,30	100,00	1,40	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
fA[2]	0,30	15,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
fA[3]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
fA[4]	0,48	23,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,92	46,03	1,20	60,00
fA[5]	0,48	23,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,44	0,21	10,35
fA[i]	2,00	100,00	1,30	100,00	1,40	100,00	2,00	100,00	2,00	100,00

(dick = Untergrund auf der Unterwasserkamera, kursiv = konstanter Parameter, rot = ausgeschalteter Parameter), gemessene Tiefe: 5,74 m, Untergrund der Station: fA[1]=Sand-1. Neben der Spalte der jeweiligen Fit-Werte sind die Bedeckungsgrade in % angegeben)

Die Ableitung der Wassertiefe (5,74 m) konnte bei bekannten Wasserinhaltsstoffen (fit_1) auf 63 cm genau abgeleitet werden. Das Programm hat dabei für den Untergrund eine Mischung aus allen Hauptspektren außer fA[3] gewählt. Bei fit_2 konnten die Wassertiefe durch Änderung der Startparameter auf 28 cm genau ermittelt werden. Die übrigen Untergründe wurden mitgefittet und erhielten vom Programm eine Bedeckung von 0%. Eine manuelle Anpassung des Parameters für Sand auf 1,4 konnte die Wassertiefe auf 3 cm genau wiedergeben (fit_3). Bei einer Mitberechnung der Wasserparameter und Sensortiefe wurde die Wassertiefe um 83 cm unterschätzt und der Sandboden zu 0% erkannt. Für die Letzte Ableitung (fit_4) ohne die Untergründe Sand-1 und Sediment-hell vergrößert sich der Fehler der abgeleiteten Wassertiefe auf 1,3m (fit_5).

T4-04

An dieser Station war es sonnig und diesig. Während der Messung mit dem Ramses-System lag die Wassertiefe bei 4,66 m und der Sensor befand sich 0,49 m im Wasser und der Sonnenzenithwinkel war 59,60°. Der Untergrund bestand aus einer Mischung aus Sand und Sediment, die nur äußerst wenig sichtbar waren, mit einer sehr dichten Auflage brauner Algen und Muscheln und vereinzelt Seegras (Abbildung 39). Da immer eine gewisse Drift des Schiffes vorhanden ist, zeigen die Unterwasserbilder auch, dass sich die Zusammensetzung des Untergrunds in kurzen Abständen ändert.



Abbildung 39: Unterwasserfoto der Station T4-04

Quelle: Foto Unterwasserkamera

Für diese Station wurden 2 Fits durchgeführt:

fit_1:

Fitparameter: zB, fA[0]-fA[5], konstante Parameter: Parameter der Wasseruntersuchung (C[0], C_X, C_Y, S), Sensortiefe ($z = 0.49$)

fit_2: Fit-Parameter von C[0], C_X, C_Y, S, z, zB, fA[0]-fA[5]

Die gefitteten Spektren, sowie die invertierte in-situ Messung sind in Abbildung 40 dargestellt.

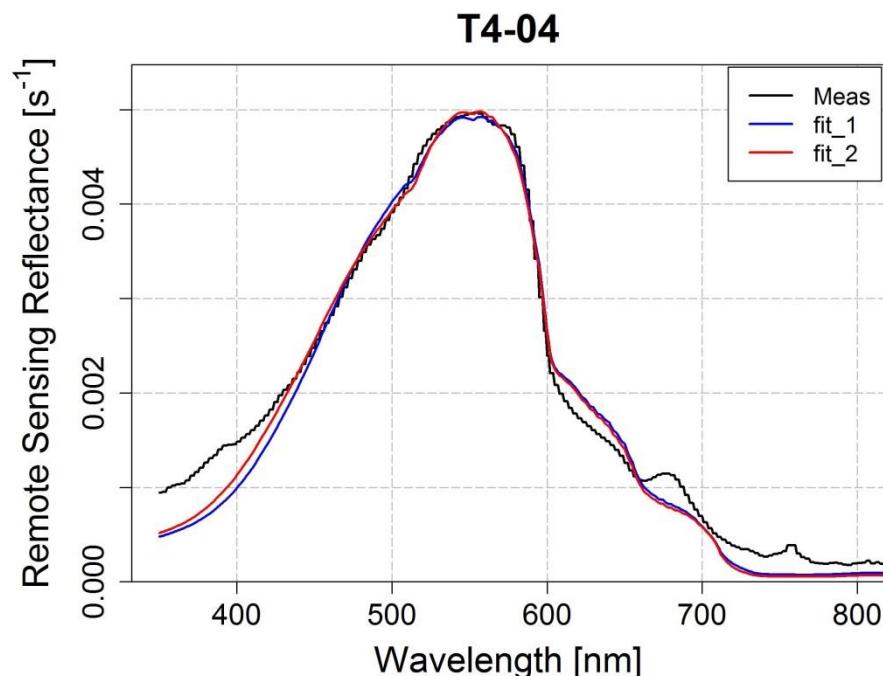


Abbildung 40: Fit-Ergebnisspektren T4-04

Die beiden Fit-Spektren unterscheiden sich kaum und liegen zwischen 420 und 600 nm sehr genau auf dem gemessenen Spektrum. Im Vergleich zum sandigen Untergrund

(Abbildung 38) passen die Fit-Spektren bei dieser Bedeckung im Bereich von 600 bis 700 nm (Fitbereich: 400-725 nm) nicht so gut überein.

Tabelle 9: Fit-Ergebnisse der Station T4-04

T4_04	fit_1	fit_1 [%]	fit_2	fit_2 [%]
zB	3,57		2,70	
fA[0]	0,00	0,00	0,11	22,00
fA[1]	0,00	0,00	0,00	0,00
fA[2]	0,00	0,00	0,00	0,00
fA[3]	0,06	0,00	0,10	20,00
fA[4]	0,00	9,00	0,10	20,00
fA[5]	0,61	91,00	0,19	38,00
fA[i]	0,70	100,00	0,50	100,00

(dick = Untergrund auf der Unterwasserkamera, gemessene Tiefe: 4,66 m)

Durch die Inversion dieser Station wurde die Wassertiefe unter Eingabe der Wasserparameter und Sensor Tiefe knapp über 1 m unterschätzt, bei Behandlung der Parameter als Fit-Parameter vergrößerte sich der Abstand zur tatsächlichen Wassertiefe auf 1,96 Meter. Eine sichere Aussage über die wirkliche Zusammensetzung des Untergrunds kann hier aufgrund dessen Heterogenität nicht getroffen werden.

T4-06

Das Wetter war sonnig mit vereinzelten Zirren, der Sensor befand sich durchschnittlich in einer Tiefe von 0,43 m und einem Abstand zum Grund mit 2,31 Metern. Die zu ermittelnde Wassertiefe mit WASI ist daher 2,74 m. Der Sonnenzenithwinkel lag bei 53,13°. Der Untergrund ist ähnlich wie der der Station T4-04 und besteht aus Sand, Seegras, braunen Algen und vereinzelt Muscheln.



Abbildung 41: Unterwasserfoto der Station T4-06

Quelle: Foto Unterwasserkamera

fit_1:

Fitparameter: zB, fA[0]-fA[5], konstante Parameter: Parameter der Wasseruntersuchung (C[0], C_X, C_Y, S), Sensortiefe ($z = 0.43$)

fit_2: Fit-Parameter von C[0], C_X, C_Y, S, z, zB, fA[0]-fA[5]

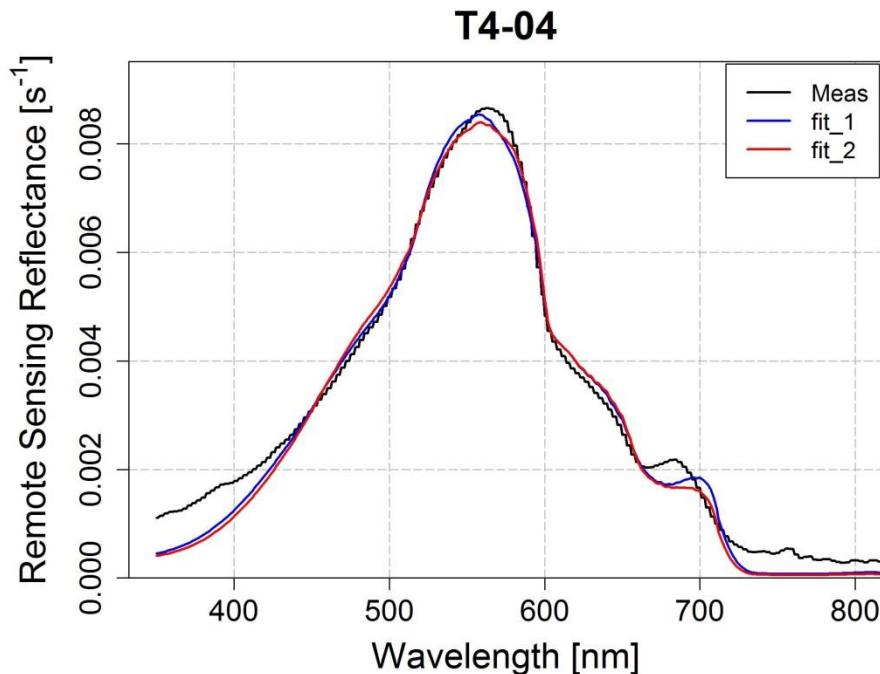


Abbildung 42: Fit-Ergebnisspektren T4-04

Die Fit-Spektren passen zwischen 450 und 620 nm sehr gut zusammen. Der Fit mit bekannten Parametern hat den Bereich um 700 nm besser getroffen. Die Fit-Ergebnisse der Untergründe befinden sich in Tabelle 10:

Tabelle 10: Fit-Ergebnis der Station T4-06

T4_06	fit_1	fit_1 [%]	fit_2	fit_2 [%]
zB	2,26		1,93	
fA[0]	0,00	0,00	0,12	64,43
fA[1]	0,13	17,68	0,02	1,02
fA[2]	0	0	0,13	7,70
fA[3]	0,01	0,75	0,09	5,41
fA[4]	0,36	52,20	0,37	7,96
fA[5]	0,21	29,37	0,00	21,44
fA[i]	0,71	100,00	1,74	100,00

(dick = Untergrund auf der Unterwasserkamera, gemessene Tiefe: 2,74 m, Untergrund)

Bei der Inversion mit bekannten Wasserparametern konnte an dieser Station die Wassertiefe auf 48 cm genau abgeleitet werden. Bei der Annahme, dass der Untergrund

des Fotos auch auf den der Messung zutrifft, wurden dort bei fit_1 auch die Untergründe gut erkannt. Bei fit_2, an dem auch die Wasserparameter und Sensor Tiefe mitgefittet wurden konnte die Wassertiefe noch auf 81 cm genau abgeleitet werden.

6.6 Ableitung der Wassertiefe aller Messungen (Validierung)

Um die Ableitung der Wassertiefe mit den neuen Untergründen zu validieren, wurden alle Einzelmessungen der Stationen der Unterwasser-Messungen von flachem Wasser, an denen Daten über Sensor Tiefe und Abstand zum Grund vorhanden waren, invertiert. Die Startparameter und deren Grenzen wurden eingestellt wie in Tabelle 4 beschrieben. Als Fit-Parameter wurden gesetzt: C[0], C_X, C_Y, S, z, zB, fA[1]-fA[5]. (fA[0] = const., fA[1] = Sand-1, fA[2] = Schlick-hell, fA[3] = Desmarestia aculeata (Blutroter Seampfer), fA[4] = Zostera marina-1 (Gewöhnliches Seegras), fA[5] = Mytilus-edulis-1 (Gemeine Miesmuschel))

Das Ergebnis ist in Abbildung 43 dargestellt, die schwarze Linie ist die 1:1-Gerade, die rote Linie die Regressionsgerade der Messungen. Die blauen horizontalen Linien stellen den geschätzten Fehler der gemessenen Wassertiefe dar. Da die Tiefe des Sensor über einen Drehgeber ermittelt wurde, ist dieser Wert konstant. Durch Schaukeln des Schiffes änderte sich jedoch die Sensor Tiefe teilweise stark, sodass es an einigen Stationen sehr schwer war, das komplette System unter Wasser zu halten. Die Wassertiefe wurde aus dem Abstand zwischen Sonar und Grund, sowie der Tiefe des Sensor berechnet, weshalb ein möglicher Fehler für die Änderung der Wassertiefe von bis zu 0,5 Metern angenommen wurde.

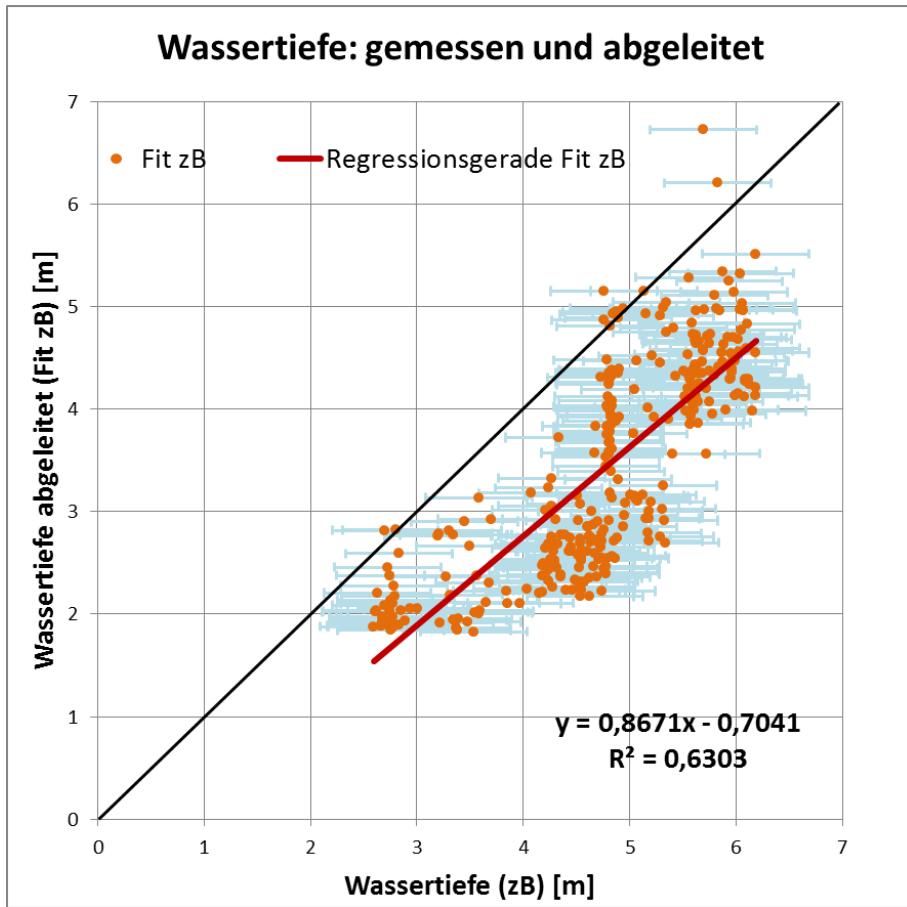


Abbildung 43: Wassertiefe gemessen und abgeleitet

Mit der gewählten Einstellung der Grenzen der Fit-Parameter wurden die Messergebnisse durch Inversion in WASI im Mittel auf $1,33 \pm 52$ cm (Mittelwertabweichung) abgeleitet. Auf der Abbildung ist zu erkennen, dass die Regressionsgerade der abgeleiteten Wassertiefen um etwa 0,7 nach unten verschoben ist, die Steigung aber von der 1:1 Linie nur um 0,13 abweicht.

7 Diskussion

Abschließend wird die Qualität der Ergebnisse der Reflexionsspektren in der Datenbank sowie deren Einfluss auf die Bestimmung der Wassertiefe und die Ableitung der Wassertiefe aus den gewonnenen Reflexionen der Unterwassermessungen analysiert.

7.1 Qualität und Bedeutung der spektralen Datenbank

Die Ergebnisse der spektralen Datenbank (Ergebnisse in Kapitel 6.1) sind aus Spektren zusammengesetzt, die teils sehr stark hinsichtlich ihrer Amplitude (Sand, Schlick und Ton) und bezüglich des spektralen Verlaufs oberhalb von 700 nm variieren (Seegras, Stacheltang). Bei einer Studie zur weltweiten Kartierung von Korallenriffen (Hochberg et al. 2003) wiesen die Daten Sand und Seegras ebenfalls große Spannbreiten auf. Für die Datenbank wurden ausschließlich Messungen verwendet, die einer sorgfältigen Qualitätskontrolle unterworfen wurden und die aufgrund der Beschreibung, des spektralen Verlaufs und der Fotodokumentation eindeutig zuzuordnen waren. Die Messung im Labor bestätigte, dass trotz der wechselhaften Wetterbedingungen brauchbare und plausible in-situ Daten von Sand, Schlick und Ton gesammelt werden konnten. Eine Überprüfung der Ergebnisse der Reflexionen von Muscheln und Makrophyten wurde aufgrund deren begrenzten Haltbarkeit nicht durchgeführt.

Die Variabilität der Spektren des Gewöhnlichen Seegrases und des Stacheltangs kommt daher, dass bei Entnahme der Proben immer eine Ansammlungen der Makrophyten vermessen wurden und sich die Pflanzenindividuen untereinander durch ihre Reflexion im nahen Infrarot unterscheiden. Das zeigt die natürliche Vielfältigkeit innerhalb einer Art. Genau diese Vielfältigkeit erschwert dabei Klassifikationen, da es in der Praxis nicht möglich ist, alle Untergründe eines Gebiets zu kennen. Die Ergebnisse der Datenbank bedeuten also, dass die spektralen Eigenschaften der Untergründe von Natur aus sehr unterschiedlich sein können und es daher keine allgemeingültigen Reflexionsspektren für eine Art oder einen bestimmten Untergrunds geben kann. Diese Erkenntnis sollte bei Inversionen von z.B. der Wassertiefe oder bei der Entwicklung neuer Methoden mit einbezogen werden.

7.2 Einfluss der Bodenreflexion auf die Bestimmung der Wassertiefe

Das Ergebnis der Ableitung der Wassertiefe aus simulierten Remote-Sensing-Reflectance Spektren liefert zwei Erkenntnisse. Bei einer 100% Bedeckung des Meeresbodens mit Sand, Muscheln, Schlick, Ton oder dem Blutroten Seeampfer konnte die Wassertiefe sehr zuverlässig abgeleitet werden (für Sand-1 im Mittel auf 10 ± 10 (Mittelwertabweichung)). Ist der Untergrund ausschließlich mit Seegras oder Stacheltang bedeckt, führt dies zu erheblichen Fehlern. Bei Seegras wichen dabei die abgeleiteten Wassertiefen im Mittel um 2,74 Meter von der tatsächlichen Tiefe ab.

Ein Grund könnte sein, dass Wasser im roten infraroten Spektralbereich sehr stark absorbiert und die übrigen Merkmale beziehungsweise die charakteristischen Spektralbereiche dieser Spektren äußerst dunkel sind, so dass nur wenig Signal bis an den Sensor gelangt. Dieses Problem ist besonders beim Stacheltang zu sehen, bei dessen 100%-iger Bedeckung die Wassertiefe nur bis 3 Meter abgeleitet werden kann, da bei größeren Tiefen für diesen Untergrund der Algorithmus versagt. Dabei scheint die dies nicht nur von der geringen Reflexion abhängig zu sein, da Mytilus-edulis-2 (Gemeine Miesmuschel) sowie Schlick-dunkel ebenfalls sehr wenig im Bereich des sichtbaren Lichts reflektieren und trotzdem die Wassertiefe über diesen Untergründen sehr gut abgeleitet werden kann. Der Grund dafür könnte sein, dass das Programm aus den übrigen Reflexionsspektren ein passendes Mischspektrum erzeugen kann. Denn beispielsweise wurde eben diese Bedeckung von Mytilus-edulis-2 vom Programm nicht als solches erkannt. Die beste Erkennung fand über Sand-1 statt, was vermutlich auch der Grund für die guten Ergebnisse der Wassertiefenbestimmung über diesem Untergrund ist.

7.3 Ableitung der Wassertiefen aus in-situ Daten der Messkampagne

Eine Überprüfung des Einflusses der Bodenreflexion auf die Bestimmung der Wassertiefe für bestimmte Bedeckungen des Untergrundes aus in situ Daten der Unterwasserreflexion war durch die hohe Variabilität des Bodens sehr begrenzt, da die Bilder der Unterwasserkamera nicht mit Sicherheit den Untergrund der Messungen des Ramses-Systems zum Zeitpunkt der Unterwassermessung wiederspiegeln. Dazu könnten im weiteren Verlauf der Methodenentwicklung die Messungen des Systems kurz über Grund genauer analysiert werden.

Bei der Station T2-05_2 kann mit sehr hoher Sicherheit davon ausgegangen werden, dass dort ein sandiger Untergrund vorhanden war. An dieser Station konnte die Wassertiefe bei Eingabe der Ergebnisse der Wasserprobenuntersuchung auf 28 cm genau ermittelt werden. Eine Änderung der Starwerte sowie eine manuelle Anpassung der Bodenbedeckung im Programm auf reinen Sand, lieferte dabei noch bessere Ergebnisse von bis zu 3 cm. Das bedeutet, wenn der Sand erkannt würde könnten die Ergebnisse deutlich verbessert werden. Ein Hinweis wäre dazu, den Algorithmus für die Bestimmung der Wassertiefe stufenweise vorgehen zu lassen, sodass vor der eigentlichen Invertierung zunächst eine grobe Klassifizierung des Untergrunds stattfindet.

Die Validierung der Wassertiefe gestaltete sich als sehr schwierig. Die Wassertiefe konnte im Mittel auf $1,33 \pm 52\text{cm}$ genau abgeleitet werden. Ein Grund für die Abweichung der abgeleiteten Wassertiefe ist, dass aufgrund hoher Wellen die Sensortiefe z mit großer Unsicherheit behaftet ist. Diese wurde über einen Drehgeber ermittelt, der an der Wasseroberfläche auf „Null“ gestellt wurde. Demnach ist der Wert der Sensortiefe für alle

Messungen konstant. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich der Sensor durch die Schwankungen des Schiffs teils tiefer, teils weniger tief im Wasser befand. Deshalb wurde angenommen, dass die aus Sensortiefe und Sonardaten berechnete Wassertiefe um $\pm 0,5$ Meter schwankte. Auch eine Möglichkeit sind vermutlich die Wetterbedingungen, bei denen bis auf wenige Stationen, der Himmel meist bewölkt war. Das Programm geht davon aus, dass der Himmel klar und die Strahlungsquelle die Sonne ist. Während der Kampagne herrschten jedoch oft diffuse Strahlungsbedingungen durch Wolken. Ein weiterer Grund ist vermutlich die große Zahl der verwendeten Fit-Parameter, da der Algorithmus öfter sowohl bei der Wahl der Untergründe als auch der Wasserparameter an die voreingestellten Grenzen gestoßen ist, die in dieser Arbeit sehr eng gewählt wurden. Die Steigung der Regressionsgeraden (0,87) mit einer Verschiebung um 0,70 in die Richtung geringer Wassertiefen könnte jedoch aber auch auf einen systematischen Fehler hindeuten. Vermutlich ist das Ergebnis ein Resultat aus allen genannten Gründen.

8 Zusammenfassung

Für einige Anwendungen sind räumlich und zeitlich hochauflöste Informationen über die Wassertiefe und den Untergrund in flachen Gewässern nötig. Dabei wird auf die optische Gewässerfernerkundung gesetzt.

Die optischen Eigenschaften von flachen Gewässern und Küstengewässern sind sehr komplex, da unterschiedliche Zusammensetzungen optisch aktiver Wasserinhaltsstoffe sowie der Untergrund zum gemessenen Signal beitragen. Analytische Verfahren und bio-optische Modelle versuchen dabei die Einflussfaktoren der Wasserinhaltsstoffe sowie der Bodenreflexion zu berücksichtigen und daraus beispielsweise die Wassertiefe abzuleiten.

Das Ziel dieser Arbeit war die Bereitstellung einer für die Küstengewässer der Ostsee zugeschnittenen Spektralbibliothek aus repräsentativen Reflexionsspektren der dortigen Untergründe und eine Überprüfung des Einflusses dieser Spektren im Hinblick auf die Ableitung der Wassertiefe mit einem analytischen bio-optischen Modell, dem Softwaretool Water Colour Simulator WASI. Dazu wurden während einer Schiffskampagne auf der Ostsee in der Wismarer Bucht unterschiedliche Bodenproben gewonnen und an Bord spektral vermessen. Zusätzlich wurden Messungen ober- und innerhalb der Wassersäule vorgenommen. Unterwasserfotos des Untergrunds aufgenommen, sowie einige Wasserproben entnommen, die auf den Gehalt an Schwebstoff, Chlorophyll-a sowie der Absorption von Gelbstoff untersucht wurden.

Für die Erstellung einer maßgeschneiderten Datenbank der Ostseeuntergründe wurden die Daten nach einer umfangreichen Qualitätskontrolle hinsichtlich Beschreibung und Fotodokumentation nach ihrem spezifischen spektralen Verlauf sortiert und für die Invertierung in WASI aufbereitet.

Aus den Messungen der Schiffskampagne der Bodenproben konnten 11 Reflexionsspektren für die Untergründe: Sand-1, Sand-2, Schlick-hell, Schlick-dunkel, Ton, *Mytilus edulis*-1, *Mytilus-edulis*-2 (Gemeine Miesmuschel), *Desmarestia aculeata* (Stacheltang), *Zostera marina*-1, *Zostera-marina*-2 (Gewöhnliches Seegras), und *Delessaria sanguinea* (Blutroter Seeampfer) gewonnen werden.

Um den Einfluss der unterschiedlichen Untergründe zu untersuchen, wurden in einem ersten Schritt Reflexionen für verschiedene Wassertiefen von 0,5 bis 10 Meter simuliert. In einem zweiten Schritt wurden aus diesen simulierten Daten die Wassertiefe sowie die Zusammensetzung der Untergründe abgeleitet.

Die Ableitung der Wassertiefe erwies sich bei den Untergründen Sand, Schlick, Ton, Muscheln und Blutroter Seeampfer als sehr genau (bis zu 10 cm bei Sand). Bei einer 100%-igen Bedeckung von einer der Muscheln (*Mytilus-edulis*-2) konnte die Wassertiefe auf bis zu bis in eine Tiefe von 6 Metern genau bestimmt werden. Seegras lieferte bis zu einer Tiefe von 2 Metern eine mittlere Genauigkeit von $38 \text{ cm} \pm 13 \text{ cm}$. Eine reine Bedeckung der *Desmarestia aculeata* wurde ab 3 Metern vom Modell nicht mehr erkannt

und ließ den Algorithmus scheitern. Insgesamt aber lieferte das Programm für 8 der 11 gewonnenen Bodenreflexionen der Ostseekampagne gute Ergebnisse.

Literaturverzeichnis

- Albert A. (2004): Inversion technique for optical remote sensing in shallow water. Ph. D. Dissertation. Universität Hamburg.
- Albert A., Mobley C.D. (2003): An analytical model for subsurface irradiance and remote sensing reflectance in deep and shallow case-2 waters. Optic Express 11 (22), S. 2872-2890.
- Bobsien I. (2014): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Blasentang (*Fucus vesiculosus*) und das Gewöhnliche Seegras (*Zostera marina*) in der Ostsee. RADOST-Berichtsreihe. Bericht Nr.24. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein
- Bricaud A., Morel A. Prieur L. (1981): Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains. Limnology and oceanography, 26(1), S. 43-53.
- Caceci M.S., Cacheris W.P. (1984): Fitting Curves to Data. Byte May 1984, S. 340-362.
- Dekker A., Brando V., Anstee J., Pinnel N., Kutser T., Hoogenboom E., Peters S., Pasterkamp R., Vos R., Olbert C., Malthus T.J.M. (2002): Imaging spectrometry of water. In: Basic Principles and Prospective Applications, S. 307-359. Kluwer Academic Publishers. Niederlande
- Ferrari G. M., Dowel M. D. (1998): CDOM absorption characteristics with relation to fluorescence and salinity in coastal areas of the southern Baltic Sea. Estuarine, Coastal an Shelf Science, 47(1), S. 91-105.
- Field Spectroscopy Facility (FSF) (2016): <http://fsf.nerc.ac.uk/>. Instruments. ASD FieldSpec. http://fsf.nerc.ac.uk/instruments/asd_fieldspec.shtml. (letzter Zugriff: 09.11.2016)
- Gao J. (2009): Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. In: Progress in Physical Geography 33(1) (2009), S. 103-116
- Gege P. (2010): Entity Airborne Remote Sensing. ZEISS-Messungen zur Bestimmung von CHB-Parametern. (unveröffentlicht)
- Gege P. (1994): Gewässeranalyse mit passive Fernerkundung: Ein Modell zur Interpretation optischer Spektralmessungen. Dissertation, Universität Hamburg.
- Gege P. (2014 a): A case study at Starnberger See for hyperspectral bathymetry mapping using inverse modelling. Proceedings of WHISPERS 2014, S. 1-4
- Gege P. (2014 b): WASI-2D: A Software tool for regionally optimized analysis of imaging of imaging spectrometer data from deep and shallow waters. Computers & Geosciences 62, S. 208-215.
- Gege P. (2015): The Water Colour Simulator WASI. User manual for WASI version 4.1
- Gege P., Albert A. (2006): A tool for inverse modeling of spectral measurements in deep and shallow waters. In Richardson L. L., LeDrew E. F. [Hrsg], Remote sensing of aquatic coastal ecosystem processes, Vol. 9 of Remote Sensing and Digital Image Processing, Springer Netherlands, S. 81-109.
- Gordon H. R., Morel A. (1983): Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery. A Review. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies. Barber R.T., Bowman M. T., Mooers C.N.K., Zeitzschel B. [Hrsg.], Springer-Verlag, New York inc.

- Hamamatsu Photonics (2016): <http://www.hamamatsu.com>. Home. All products. Search by product categories. Optical sensors. Image sensors. CCD image sensor. CCD image sensor (for spectroscopy). Black – thinned type CCD area image sensor S10420-1006- 01. <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/wave/index.html>
- Hochberg E.J., Atkinson M. J., Andréfouët S. (2003): Spectral reflectance of coral reef bottom-types worldwide and implications for coral reef remote sensing. In: Remote Sensing of Environment 85 (2003), 159-173. Elsevier Science Inc.
- Hübner T. (2014): Visualisierung von Secchi-Tiefen in der Ostsee zum Zwecke der Laserbathymetrie. Bachelorarbeit. Hochschule Neubrandenburg. University of Applied Sciences.
- Humminbird (2008): 500 Series™ Operations Manual. Eufaula Al. USA
- Hydro-Bios (2016): <http://www.hydrobios.de>. Home. Products. Bottom Samplers. Bottom Sampler acc. to Ekman-Birge. <http://www.hydrobios.de/product/bottom-sampler-acc-to-ekman-birge/> (letzter Zugriff: 28.10.2016)
- Ibsen Photonics (2016): <http://ibsen.com>. Products. OEM Spectrometers. FREEDOM Spectrometers. FREEDOM VIS. FREEDOM VIS 360-830 nm. <http://ibsen.com/wp-content/uploads/Ibsen-product-sheet-FREEDOM-VIS-V7.pdf> (letzter Zugriff: 30.10.2016)
- Ibsen Photonics (2016b): <http://ibsen.com/technology/the-effect-of-cooling-ccd-detectors-for-spectroscopy/> (letzter Zugriff: 02.11.2016)
- IOCCG (2000): Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex Waters. Sathyendranath, S.(Hrsg.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 3, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- Kirk J. T. O. (1994): Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press.
- Leibniz Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) (2014): <http://www.io-warnemuende.de>. IOW. MeerLernen. Ostsee in Kürze. Steckbrief der Ostsee. <http://www.io-warnemuende.de/steckbrief-der-ostsee.html> (letzter Zugriff: 27.10.2016)
- Lesser M. P., Mobley C. D. (2007): Bathymetry, water optical properties, and benthic classification of coral reefs using hyperspectral remote sensing imagery. In: Coral Reefs (2007) 26, S. 819-829.
- Linnemann K., Gege P., Rößler S., Schneider T., & Melzer A. (2013). CDOM retrieval using measurements of downwelling irradiance. In SPIE Remote Sensing International Society for Optics and Photonics.
- Linnemann K., Gege P., Rößler S., Schneider T., Melzer A. (2013): CDOM retrieval using measurements of downwelling irradiance. In: SPIE Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics.
- Loiselle S. A., Bracchini L., Dattilo A. M., Ricci M., Tognazzi A., Cózar A., & Rossi C. (2009): The optical characterization of chromophoric dissolved organic matter using wavelength distribution of absorption spectral slopes. Limnology and Oceanography, 54(2), 590-597.
- Mertes L. A. K., Dekker A. G., Brakenridge G. R., Birkett Ch. M., Létourneau G. (2004): Rivers and Lakes. In: Remote Sensing for Natural Resources Management and Environmental Monitoring: Remote Sensing. 3. Auflage. Vol. 4. Ustin S.[Hrsg.]. John Wiley & Sons, Inc.

- Mobley C. D. (1994): Light and water: Radiative transfer in natural waters. Academic press San Diego, CA
- Mobley C. D. (2001): Radiative transfer in the ocean. In: Encyclopedia of ocean sciences. S, 2321-2330
- Morel A. (1980): In-water and remote measurement of ocean color. Boundary-Layer Meteorology, 18(2), S. 177-201
- Morel A. (1974): Optical Properties of Pure Water and Pure Sea Water. In: Jerlov N.G., Steemann N. E. [Hrsg] (1974): Optical Aspects of Oceanography. Academic Press London. S. 1-24
- Morel A., Prieur L. (1977): Analysis of variations in ocean color. Limnology an oceanography, 22(4), S. 709-722
- Nelder J.A., Mead R. (1965): A simplex method for function minimization. The computer journal 7(4), S. 308-313.
- Riha J. S. (2013): Detektion und Quantifizierung von Cyanobakterien in der Ostsee mittels Satellitenfernerkundung. Dissertation. Universität Rostock.
- Pope R. M., Fry E. S. (1997): Absorption spectrum (380-700nm) of pure water. II. integrating cavity measurements, Applied Optics 36, S. 8710-8723
- Sathyendranath S., Morel A. (1983): Light emerging from the sea-interpretation and uses in remote sensing. In: Cracknell A.P. [Hrsg.] (1983): Remote Sensing Applications in Marine Science and Technology. Springer Netherlands. S. 323-357.
- Schröder T. (2004): Fernerkundung von Wasserinhaltsstoffen in Küstengewässern mit MERIS unter Anwendung expliziter und impliziter Atmosphärenkorrekturverfahren. Dissertation. Berlin.
- Schwarz J. N., Kowalcuk P., Kaczmarek S., Cota G. F., Mitchell B. G., Kahru M., Chavez F. P., Cunningham A., McKee D., Gege P., Kishino M., Phinney D. A.
- Raine R. (2002): Two models for absorption by coloured dissolved organic matter (CDOM). In: Oceanologia 44(2), S. 209-241
- Stedmon C. A., Markager S., Kaas H. (2000): Optical properties and signatures of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Danish coastal waters. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 51(2), S. 267-278.
- Trios (2016): <http://www.trios.de>. Home. Produkte. Ramses. Dokumente. D02-010de201605_Broschuere_RAMSES.PDF.
http://www.trios.de/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&g=0&t=1479292478&has_h=0bbdb4e5c43f94fd7a854bda74aa58b940a063a1&file=uploads/tx_ccascatalog/files/d02-010de201605_broschuere_ramses_01.pdf (letzter Zugriff: 11.11.2016)
- Tritech (2016): <http://www.tritech.co.uk>. Home. Products. Survey Sensors. PA200/PA500 Altimeters. Product Datasheet. <http://www.tritech.co.uk/media/products/tritech-pa200-pa500.pdf>. (letzter Zugriff: 30.10.2016)
- Zimmermann G. (1991): Fernerkundung des Ozeans. Akademie Verlag, Berlin.
- Umweltbundesamt (2014): Umweltbundesamt. Home. Daten. Gewässerbelastung. Ostsee. Eutrophierung der Ostsee.
<http://www.umweltbundesamt.de/daten/gewaesserbelastung/ostsee/eutrophierung-der-ostsee> (letzter Zugriff: 14.01.2017)
- Umweltministerium Mecklenburg-Vorpommern (2006): Managementplan für das FFH-Gebiet DE 1934-302 Wismarbucht. Schwerin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen angefertigt habe, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Schnalzger Kerstin

Gundelfingen an der Donau, den 24.02.2017