

ECOMAP

Habitatkartierung mittels innovativer optischer und akustischer Fernerkundungs- und Auswerteverfahren

Ein Beitrag von JENS SCHNEIDER VON DEIMLING und PETER FELDENS

Wie hilfreich sind neue Verfahren der optischen und akustischen Fernerkundung in der Ostsee in Bezug auf Habitatkartierung im Flachwasser? Wie sensitiv reagieren die Sensoren auf spezifische Flora und Fauna? Kann künstliche Intelligenz die Datenauswertung und Datenklassifikation entscheidend voranbringen? Und welche natürlichen Schwankungen lassen sich in den Habitaten beobachten? Diese und verwandte Fragen stellte sich ein Forschungs- und Entwicklungsverbund unter Beteiligung von Deutschland, Dänemark und Polen. Ein Teil der Fragen wurde innerhalb der dreijährigen Projektlaufzeit beantwortet, einige wichtige Ergebnisse möchten wir hier darstellen.

Habitatkartierung | multispektrale Akustik | maschinelles Lernen | Fächerecholot | optische Fernerkundung | Ostsee
habitat mapping | multispectral acoustics | machine learning | multibeam echo sounder | optical remote sensing | Baltic Sea

How useful are new methods of optical and acoustic remote sensing in the Baltic Sea with regard to habitat mapping in shallow water? How sensitive are the sensors to specific flora and fauna? Can artificial intelligence decisively advance data evaluation and data classification? And what natural fluctuations can be observed in the habitats? These and related questions were asked by a research and development network with the participation of Germany, Denmark and Poland. Some of the questions were answered during the three-year project period; we would like to present some important results here.

Autoren

Dr. Jens Schneider von Deimling lehrt und forscht an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU).
Dr. Peter Feldens forscht am Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW).

jens.schneider@ifg.uni-kiel.de

Einleitung

Das 2020 abgeschlossene EU-Projekt ECOMAP (www.bonus-ecomap.eu, [Abb. 1](#)) sondierte und optimierte Möglichkeiten zur Habitatkartierung in der Ostsee mit optischen und akustischen Verfahren per Schiff, Flugzeug und Satellit. ECOMAP wurde in Kooperation zwischen Forschungseinrichtungen (Universität Kiel, Universität Kopenhagen, Universität Danzig, Geomar, IOW), dem Geologischen Dienst von Dänemark (GEUS), Firmen (Norbit-Poland, Innomar, EOMAP) und Behörden (BSH, LKN.SH, LLUR) durchgeführt und an den Erfordernissen des Habitatschutzes ausgerichtet, der in der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL) verankert ist und darauf abzielt, die Meeresumwelt in Europa wirksam zu schützen und zu verbessern. Im Folgenden stellen wir einige Ergebnisse aus dem dreijährigen Projekt vor, an dem ca. 40 Ingenieure, Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen aus Deutschland, Dänemark und Polen beteiligt waren.

Motivation und Methoden

Durch flugzeug- und satellitengestützte Fernerkundung sind Forscher, Behörden und politische Entscheidungsträger im terrestrischen Bereich daran gewöhnt, Raumplanung und Umweltschutz

auf der Grundlage einer soliden und exakt georeferenzierten Datenbasis zu treffen. Im marinen Bereich sind derartige Informationen selten flächendeckend vorhanden; im Falle von geschleppten Messsystemen sind sie zudem mit Positionsungenauigkeiten behaftet, die speziell in der automatisierten Nachbearbeitung zu Problemen führen. Hauptgrund für die signifikant schlechtere Datenbasis als an Land ist die geringe Anwendbarkeit optischer Fernerkundung. Akustische Verfahren können Abhilfe leisten, erfordern jedoch den Einsatz von Schiffen. Insbesondere im Flachwasser sind akustische Messungen zeitaufwendig, und noch heute werden die flachen, küstennahen Zonen aufgrund dieser Datenlücken als das unkartierte »weiße Band« in der Küstenforschung betitelt.

Um diesen Unzulänglichkeiten entgegenzuwirken, haben wir in Kooperation mit unseren Industriepartnern die am besten geeignete Erfassungsmethode für spezifische Habitate im Flachwasser (ca. 0 bis 20 m Wassertiefe) gesucht und an den Schnittstellen zwischen optischen und akustischen Verfahren gearbeitet ([Abb. 2](#)). Wir konzentrierten uns hierbei auf eine Auswahl der wichtigsten Lebensräume aus ökologischer Sicht wie biologisch aktive Riffe aus Steinen und/oder Mu-

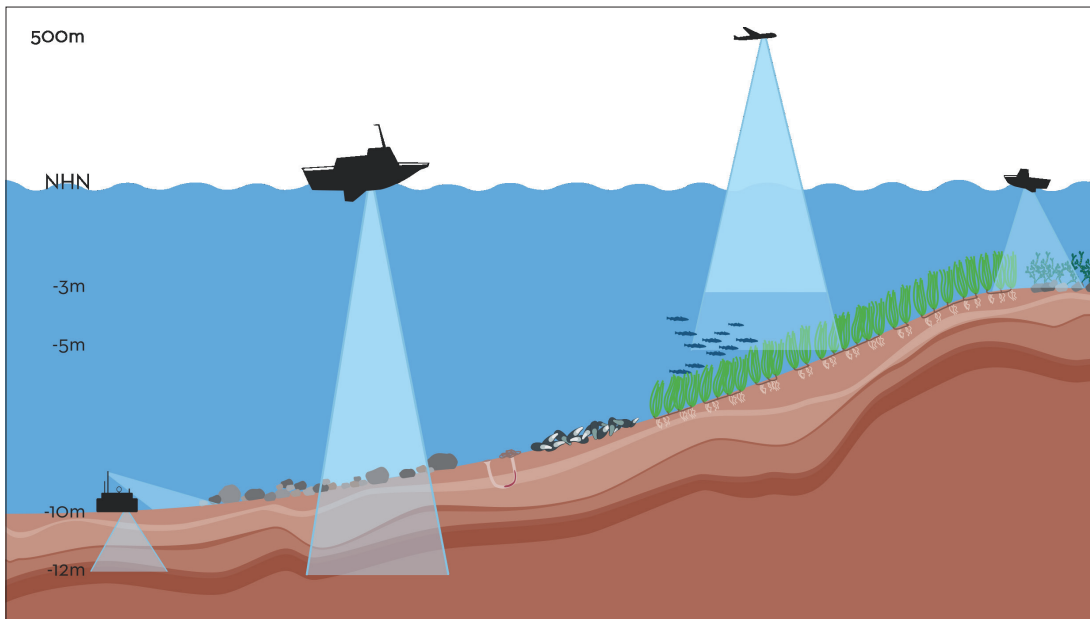


Abb. 1: Schemazeichnung zum ECOMAP-Projekt. Dargestellt sind optische Fernerkundung (Kamera, LiDAR) und akustische Fernerkundung (Fächerecholot, In-situ-Scansonar, Sedimentecholot). Unsere Zielhabitate sind aktive Riffe aus Steinen und/oder Muscheln, grabende Megafauna, Sandbänke und Seegraswiesen. Das Projekt wurde von der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) koordiniert

scheln, Gebiete mit grabender Megafauna, Sandbänke und Seegraswiesen.

Um die Kartierung der Flachwasserbereiche voranzubringen, arbeiteten wir mit optischen Daten aus dem Flugzeug (LiDAR, Kamera), mit kommerziellen Satellitenszenen (EOMAP) sowie mit schiffbasierten akustischen Verfahren (Sedimentecholot, Fächerecholot, Side-Scan-Sonar). Die eingesetzten Geräte wurden teilweise adaptiert und während weit mehr als 100 Feldtagen von den Arbeitsgruppen aus Deutschland, Polen und Dänemark in der Ostsee eingesetzt. Die Datensätze wurden in einer klassischen Forschungs- und Entwicklungsmanier bearbeitet, ausgewertet und untersucht, wobei der Forschungsschwerpunkt des Projekts auf der akustischen Habitatkartierung lag. Die im Feld tätigen ECOMAP-Mitarbeiter meldeten ihre Anforderungen an die Unternehmen, um die Arbeitsabläufe in Hinblick auf die Kartierung von Lebensräumen zu verbessern. Neben den wissenschaftlichen Errungenschaften führte dies zu technischer Weiterentwicklung von Hardware, Firmware und Software sowie zu neuen Auswerteverfahren, einschließlich der Implementierung verschiedener Datenverarbeitungsschritte unter Einbindung maschineller Lernverfahren.

Akustische Daten wurden mit verschiedenen Frequenzen zwischen 6 und 700 kHz aufgezeichnet. Wir setzten parametrische Sedimentecholote (Innomar standard, medium), kalibrierte Einstrahl-Splitbeam-Sonare (Kongsberg EK60), Side-Scan-Sonare (Edgetech, Klein) und moderne Fächerecholote (Norbit iWBMS, STX) ein, wobei der Schwerpunkt aus wissenschaftlicher Sicht auf Habitatkartierung mittels Fächerecholot (multi-beam echo sounder system), nachfolgend mit MBES bezeichnet, lag. Als Chirp-basierte Systeme wurden die Norbit-Fächerecholote mit 400 kHz als Zentralfrequenz und 80 kHz Bandbreite betrieben. Die Daten zeichneten wir teilweise mit Hypack auf (hsx) oder nativ in den Formaten wbm und s7k. RTK-Korrekturen wurden uns durch die freundliche Unterstützung der Axionet GmbH kostenfrei zur Verfügung gestellt. Die üblichen MBES-Nachbearbeitungsschritte wie Patch-Test-Kalibrierung, Raytracing, Wasserstandskorrektur und die Entfernung von Ausreißern aus den MBES-Daten wurden mit MBSsystem und QPS Qimera durchgeführt. Maßgeschneiderte Auswerteverfahren unter der Einbindung maschineller Lernverfahren erfolgten mit eigens entwickelter Software (Programmiersprachen Python, C++, D, MATLAB) der Arbeitsgruppen der CAU, des IOW, der Universität Kopen-

METHODS			
GROUNDTRUTHING <ul style="list-style-type: none"> • Camera • Sampling 	ACOUSTICS <ul style="list-style-type: none"> • Multibeam/Snippets/WCI* • 3D Seismo-acoustics* • Calibrated Backscatter* 	OPTICS <ul style="list-style-type: none"> • Multispectral Imaging* • Lidar • In-situ Laser* 	PROCESSING <ul style="list-style-type: none"> • Waveform analysis* • Spectral analysis* • Statistics

Abb. 2: Darlegung der eingesetzten Methoden. Das Sternchen (*) deutet Methoden an, die im Projekt entscheidend weiterentwickelt wurden; entsprechende Publikationen sind auf der Projektseite verlinkt (www.bonus-ecomap.eu)

hagen sowie der Universität Danzig und stehen teilweise auf GitHub zur freien Verfügung.

Darüber hinaus wurden »Nicht-Standard«-Daten aufgezeichnet und dafür maßgeschneiderte Auswertelgorithmen implementiert, um z. B. kalibrierte Fächerecholot-Rückstreudaten, multispektrale MBES-Daten oder Full-Wave-Form-LiDAR-Daten besser interpretieren zu können. Dies sind vielversprechende Techniken, die jedoch aus Gründen des derzeit noch komplexen Workflows und unter Betracht von Kosteneffizienz für kommerzielle Anwendungen zu aufwendig sind und bisher wenig zum Einsatz kommen.

Optische und akustische Detektion subaquatischer Vegetation

Die Ostsee gilt als optisch trübes Gewässer, dennoch finden sich immer wieder Episoden mit guten Sichtbedingungen und Secchi-Tiefen von 8 m und mehr (Niemeyer et al. 2015). Optische Analysen wurden mit Hilfe kommerzieller Satellitenszenen, luftgestützter LiDAR- und Bildgebungssysteme (Riegl VQ 820), luftgestützter Drohnen und Dropdown-Unterwasseraufnahmen durchgeführt. Unser KMU-Partner EOMAP untersuchte vier Spektralbänder kommerzieller Satellitendaten mit einer

lateralen Auflösung von 2 bis 3 m und korrigierte die Szenen mit einem ausgefeilten atmosphärischen Korrekturmodell, um eine vom Satelliten abgeleitete Bathymetrie zu erstellen, und erreichte eine maximale Durchdringung des Wassers mit Licht von 7 m.

Des Weiteren erlauben Satelliten und Luftbildaufnahmen eine fernerkundliche Habitatkartierung im Flachwasser, wie z. B. die Erfassung subaquatischer Vegetation mittels multi- oder hyperspektraler Fernerkundung (Heege et al. 2003; Fritz et al. 2017). Die Technik wurde in der Ostsee im Rahmen von satellitengestützten Auftragskartierungen erstmalig 2017 vom LLUR zur Bestandsaufnahme der gesamten schleswig-holsteinischen Küste eingesetzt (Hartmann et al. 2019). EOMAP erstellte eine Klassifizierung des Meeresbodens für unsere Gebiete und zeigte, dass Seegras, reine Sandgebiete, Restsedimente und Gebiete mit Muscheln unterschieden werden können. Weitergehende Studien, basierend auf frei verfügbaren Sentinel-Aufnahmen unter Einbindung von LiDAR, wurden durchgeführt (Kuhwald et al. 2021; Oppelt et al., in dieser Ausgabe). Hier konnten die Klassen »dichte Seegraswiesen«, »von Seegras dominierte Gebiete«, »reine Sandgebiete« und »Restsedimentgebiete« unter Zuhilfenahme von Luftbildern und Videoschlepptransekten bis in eine Wassertiefe von 5 m mit ca. 82 % Verlässlichkeit ermittelt werden.

Direkt zu Projektstart am 1. September 2017 gelang es uns in Kooperation mit dem LKN.SH, ein »optisches Fenster« mit nahezu idealen Sichtbedingungen unter Wasser abzusuchen (Abb. 3a und Abb. 3b). Bei einer Fluggeschwindigkeit von etwa 100 Knoten/h und einer Abdeckung von 200 m in einem LiDAR-Streifen konnte die Bathymetrie mittels Riegl VQ-820 bis zu 5 m Tiefe mit einer vertikalen Auflösung von etwa 0,1 m und einer horizontalen Auflösung von 0,5 m erfasst werden (Abb. 3c). Unter optimalen Bedingungen bei einem Überflug im September 2019 zeigten die Riegl-VQ-880-Daten eine LiDAR-Eindringung von bis zu 12 m Tiefe vor Frederikshaven (Schneider von Deimling et al. 2020). Generell zeigen LiDAR-Daten systematisch Seegrasvegetation auf dem Meeresboden in Form von abnormalem Rückstreuverhalten an (Abb. 3). Wie gut sich solche Daten für quantitative Biomasseanalysen eignen, wird derzeit untersucht.

Darüber hinaus lieferten nachfolgende Überflüge Luftbilder mit einer Auflösung von 0,1 m und zeigen Steinfelder und einzelne Steine, Seegraswiesen und Rotalgen bis zu einer Wassertiefe von etwa 5 m. Fehlklassifizierungen entstehen insbesondere bei Mischhabitaten. Probleme bereiten auch Vegetationsreste von abgestorbenem oder ausgerissenem Pflanzenmaterial (Detritus), welches lokal akkumulieren kann und optisch und spektral täuschend ähnlich wirkt wie gewachsene Vegetation (Abb. 3a).

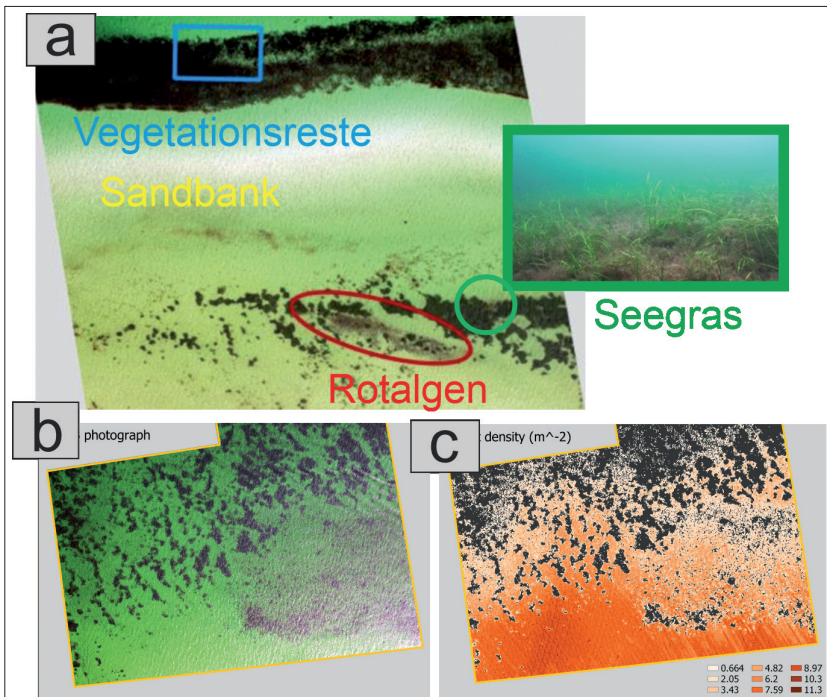


Abb. 3: **a:** Luftbildaufnahme aus dem Flugzeug vom 1. September 2017 zum Projektstart von BONUS ECOMAP vor der Küste von Heidkate. Die Wassertiefen im Bildausschnitt reichen von 1,2 bis 2,1 m und wurden vor Heidkate bei Kiel mit einer Hasselblad H5Dc während eines LiDAR-Überflugs mit Riegl VQ-820 erhoben, der in Kooperation mit dem LKN.SH durchgeführt wurde (DIMAP Spectral GmbH). Der Rotalgen-Patch umfasst ca. 10 × 70 m. Die dunklen Patches im Süden stammen von Seegras (inlet), der dunkle Streifen stellt allerdings einen Bereich mit Pflanzenresten (Detritus) und Algen dar, die strömungsbedingt an der Sandbank anlagern. Die Validierung erfolgte durch das wissenschaftliche Tauchteam der CAU (Wallmeier 2019; Schneider von Deimling et al. 2020). **b:** Benachbarte Luftbildaufnahme. **c:** Gleichzeitig gewonnene topobathymetrische LiDAR-Daten. Im Vergleich zeigt sich eine sehr starke Korrelation zwischen Fehlechos (schwarz) und Vegetation

Gelingt es, Überflüge während optisch günstiger Bedingungen durchzuführen, so können überraschend gute Ergebnisse eingefahren werden. Unsere Messungen zeigen, dass luft- und welt-raumgestützte optische Messungen zumindest episodisch eine flächendeckende Kartierung des Meeresbodens im »weißen Band« (Flachwassergebiete) in der Westlichen Ostsee bis ca. 5 m ermöglichen. Obwohl diese Technologie nicht die gleiche Genauigkeit, Tiefenwirkung und Auflösung wie Fächerecholotsysteme oder LiDAR erreicht, ist sie eine schnelle, kostengünstige und großflächige ergänzende Technik (Tabelle 1). Weltraum- oder luftgestützte Daten können von enormem Wert sein als Planungsgrundlage (Pre-Survey) für den zeitaufwendigen Einsatz höher auflösender Messverfahren und für Probenahmen, welche für eine erfolgreiche Klassifizierung nach wie vor notwendig ist. Die Möglichkeit, durch wiederholte Überflüge die zeitliche Entwicklung zu verfolgen, birgt großes Potenzial für die Kartierung und Überwachung der Geo-Biodiversität und der benthischen Lebensräume in solch flachen Gewässern (< 5 m).

Ein Hauptaugenmerk lag darauf, das Seegras *Zostera marina* mit opto-akustischen Methoden besser zu erfassen. Seegraswiesen bilden in der Ostsee das hinsichtlich Ökosystemfunktionen wichtigste Habitat; deren Vorkommen wurde bisher mittels geschleppter Kamera kartiert und modelliert (Schubert et al. 2015). Ein Überflug am ersten Projekttag, am 1. September 2017 zeigte, dass Seegras aus Luftbildern und bis zu einer Tiefe von 5 m optisch erfassbar erscheint (Abb. 3) und von zeitgleich auftretenden Rotalgen anhand der RGB-Werte bzw. entsprechenden Indizes getrennt werden kann (Wallmeier 2019). Mögliche Interaktion von LiDAR mit Vegetation wurde bereits als Problem in Bezug auf Kartierung des Gewässerbodens erkannt (Niemeyer et al. 2015). Erste Ergebnisse zeigen, dass LiDAR vermutlich quantitative Ergebnisse liefern kann in Bezug auf Seegrasvorkommen in der Ostsee, zumindest bis ca. 5 m (Wallmeier 2019). Neuere Aufnahmen inklusive Full-Wave-Form befinden sich in der Auswertung.

Die optische Transparenz in unserem Referenzarbeitsgebiet vor Heidkate war besser als erwartet. Folglich führten wir regelmäßig Drohnenüberflüge durch, um einen Einblick in die saisonale Entwicklung der Seegraswiesen zu erhalten (Gross et al. 2020). Eine Analyse der Überflüge mit dem Flugzeug und der Drohne zeigte, dass optische Methoden jenseits von 5 oder 6 m Wasser nicht verlässlich arbeiten (Wallmeier 2019). Folglich ist für die Fernerkundung bis zu den maximalen Tiefenvorkommen von *Zostera marina* – das in der westlichen Ostsee zwischen 7 und 9 m liegt (Schubert et al. 2015) – ein akustisches Monitoring erforderlich, um die Bestände komplett abbilden zu können.

Um auch Seegrasvorkommen jenseits der 5-m-Tiefenlinie verlässlich kartieren zu können, erarbei-

Methode	km ² /h	Auflösung
In-situ-Video	~ 0,02	cm
MBES @ 5 m	~ 0,6	cm bis dm
Airborne LiDAR/Imaging	20	dm bis m
Synthetic Aperture Radar	2 Mio	5 m
Sentinel-2	10 Mio	10 m

Tabelle 1: Flächenleistung der optischen und akustischen In-situ-Methoden (geschleppte Kamera) und Fernerkundungsmethoden (Satellit, Flugzeug, Schiff)

teten wir ein MBES-basiertes Verfahren (Abb. 4). Als Fächerecholot setzten wir ein kalibriertes Norbit-ECOMAP-Prototyp-Sonar ein sowie das CAU-eigene Norbit iWBMS mit integriertem Applanix Wave-master INS und Online-c-keel-Sonde von AML.

Häufig werden für die akustische Habitatkartierung Rückstreudaten von Seitensichtsonaren ana-

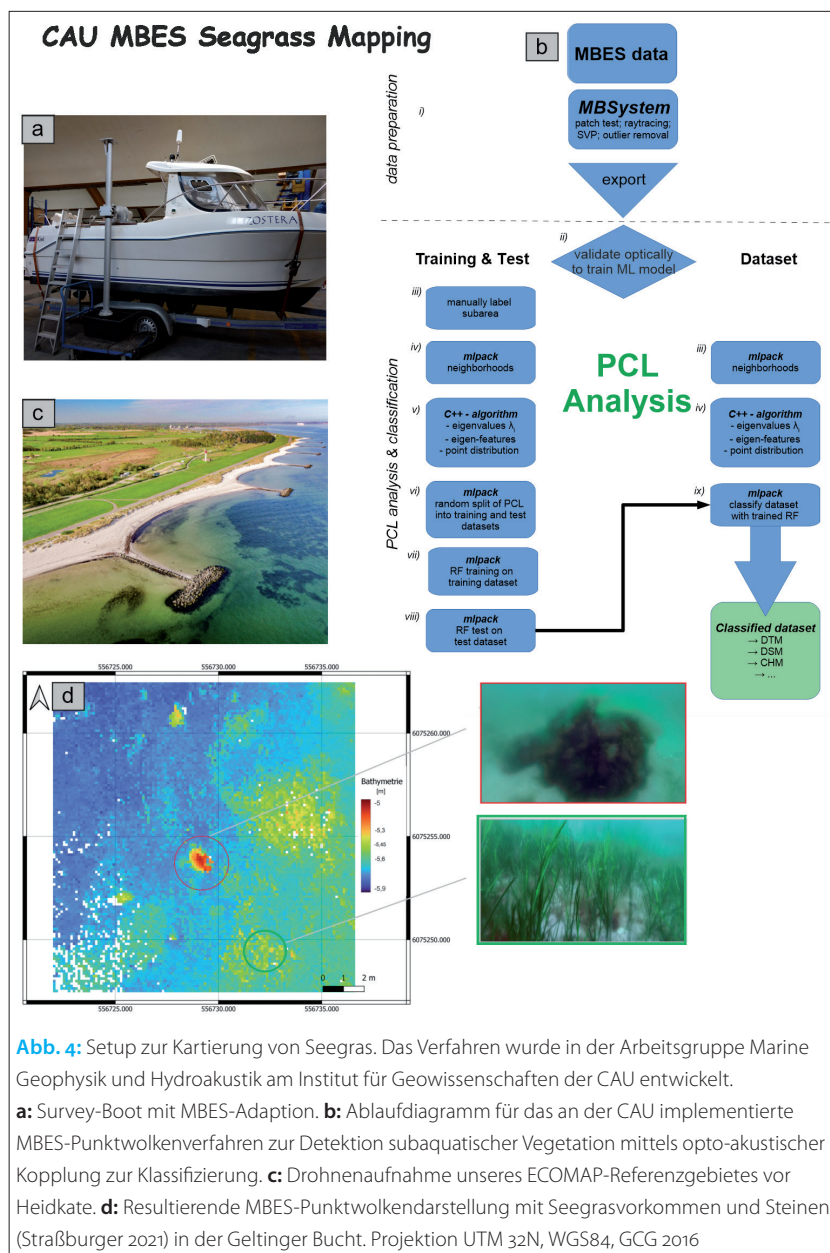


Abb. 4: Setup zur Kartierung von Seegras. Das Verfahren wurde in der Arbeitsgruppe Marine Geophysik und Hydroakustik am Institut für Geowissenschaften der CAU entwickelt.

a: Survey-Boot mit MBES-Adaption. **b:** Ablauffdiagramm für das an der CAU implementierte MBES-Punktwolkenverfahren zur Detektion subaquatischer Vegetation mittels opto-akustischer Kopplung zur Klassifizierung. **c:** Drohnenaufnahme unseres ECOMAP-Referenzgebietes vor Heidkate. **d:** Resultierende MBES-Punktwolkendarstellung mit Seegrasvorkommen und Steinen (Straßburger 2021) in der Geltinger Bucht. Projektion UTM 32N, WGS84, GCG 2016

lysiert. Unser Ziel war es jedoch, nicht nur Seegras akustisch zu detektieren, sondern dessen Vorkommen exakt zu vermessen, um mögliche Bestandsveränderungen in wenigen Jahren mittels eines wiederholten Surveys erfassen zu können. Eine Kartierung mit Genauigkeiten im Bereich von wenigen Zentimetern bis Dezimetern ist jedoch nur mittels RTK-GPS-Navigation, Beamforming und Bewegungskompensation möglich und damit für Seitensichtsonare nicht erreichbar.

Aus der hydrographischen Vermessung per Echolot ist bekannt, dass Bodenfindungsalgorithmen signifikant durch Vegetation gestört werden. Dies hat bis heute zur Folge, dass die Daten manuell und zeitaufwendig editiert werden, um den Einfluss der Vegetation zu eliminieren. Für den Fall von *Zostera marina* wurde dies im Arbeitsgebiet für Fächerecholotdaten bestätigt: Selbst Vorkommen von nur wenigen Sprossen Seegras pro Quadratmeter führen bereits zu signifikanten akustischen Anomalien (Lübmann 2018). Auch in Sedimentecholotdaten erscheint Seegras als deutliche Anomalie in der Wassersäule (Innomar). Die Anomalien der Rückstreuung durch Seegras sind spezifisch. Zum einen streut Seegras signifikant zurück zum Sender, zum anderen ist es akustisch transparent und erlaubt teilweise die Sicht auf den darunter befindlichen Meeresboden und führt zu multiplen Rückstreuungsmustern. In MBES-Daten treten Fehldetektionen durchgängig über den gesamten Fächer hinweg auf und erscheinen darüber hinaus recht unabhängig von der Art der Bodenerkennung (Phase, Amplitude) zu sein. Aufgrund dieses spezifischen Verhaltens mit dem Ziel, die Problematik in den Griff zu bekommen bzw. Seegras klar von der Gewässersohle trennen zu können, entwickelten wir spezifische Datenmerkmale (Features) in einem Punktwolken-Analyseverfahren, welches seinen Ursprung in der Astronomie hat und bereits bei der Auswertung von LiDAR zum Einsatz kommt. Die bereinigte, nicht gerasterte dreidimensionale Punktwolke (3D PCL) wurde als kartesische Koordinaten exportiert (XYZ-ASCII UTM 32 Nord). Anschließend wurde für jeden individuellen Punkt bzw. für jedes Sounding eine zylindrische Nachbarschaft innerhalb eines 0,5-m-Suchradius ermittelt. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Nachbarschaft von 88 Punkten. Die Nachbarschaften der einzelnen Punkte wurden mit der sehr schnellen Open-Source-Bibliothek für maschinelles Lernen mlpack berechnet. Der benachbarte Raumbezug jeder einzelnen Echolotung wurde anschließend in Hinblick auf die Parameter Sphärizität, Linearität und Planarität und weiteren Ableitungen analysiert (Held und Schneider von Deimling 2019). Durch die Berechnung der abgeleiteten Parameter erhöht sich die Datenmenge temporär um den Faktor neun.

Essenziell für den Erfolg maschineller Lernverfahren und das sogenannte überwachte Lernen ist

die Generierung eines guten Trainingsdatensatzes. Für dessen Aufbau integrierten wir optische Aufnahmen aus dem Flugzeug im Flachwasser in das Training der akustischen Daten. Eine Validierung erfolgte durch die Forschungstaucher der CAU. Anschließend trainierten wir das Datenmodell mittels eines Random-Forest-Algorithmus und transferierten das fertige Modell in optisch undurchsichtiges Wasser auf akustische Daten. Die resultierende Modellgenauigkeit erreichte eine Trefferquote von über 96 % für die Klasseneinteilung »Vegetation« gegen »Meeresboden«. Nachdem diese MBES-Verarbeitung durchgeführt wurde, liefert das Verfahren bereinigte Bathymetrie, die räumliche Abdeckung von Seegras und die Bewuchshöhe in bisher nicht erreichter Genauigkeit. Momentan untersuchen wir die Verlässlichkeit des Verfahrens unter Hinzunahme von Steinen als mögliche Verwechslungskandidaten; Details des Verfahrens können in Held und Schneider von Deimling (2019) eingesehen werden.

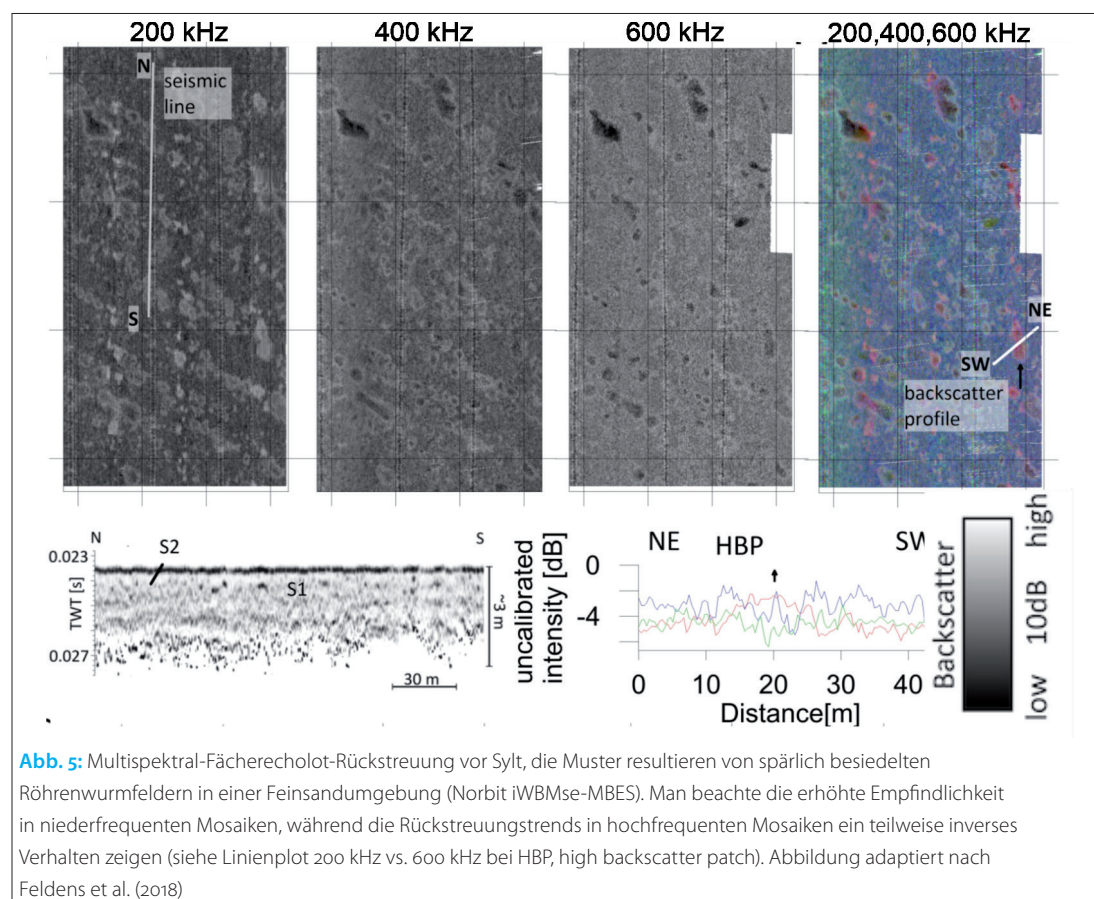
Vom Side-Scan-Sonar zum Multispectral-Snippet-Multibeam

Side-Scan-Sonar-Systeme sind für die geologische Kartierung des Meeresbodens in der Ostsee weit verbreitet und werden von vielen nationalen Behörden aufgrund ihrer Benutzerfreundlichkeit, erhöhten Abdeckung und Zeiteffizienz bevorzugt für die Kartierung von Habitaten eingesetzt. Die Ergebnisse aus ECOMAP legen dar, wie moderne Fächerecholotsysteme die klassischen Side-Scan-Vermessungen ergänzen können, sowohl für die biotische als auch für die abiotische Kartierung des Meeresbodens. Mit dem Aufkommen der sogenannten Snippet-Technologie, die in modernen MBES implementiert ist, können side-scan-ähnliche Karten mit einer theoretischen Auflösung von bis zu 1 cm über die Spur hinweg erstellt werden, während die Bathymetrie aufgezeichnet wird. Die praktisch nutzbare Auflösung wird dabei weiterhin von der durch die Fahrtgeschwindigkeit kontrollierten Along-Track-Auflösung sowie der Wassertiefe limitiert. Bis in Tiefen von etwa 20 m können mit auf Schiffen installierten MBES allerdings Rückstreumosaiken von ähnlich guter Anwendbarkeit wie bei geschleppten Side-Scan-Sonaren erzielt werden. Ein wichtiger Vorteil von MBES ist die eng gekoppelte RTK-GPS-Navigation mit cm-Genauigkeit, die Bewegungskompensation des Schiffes und damit die exakte geografische Co-Registrierung von Bathymetrie und Rückstreuung, die darüber hinaus eine Voraussetzung für die Identifizierung kleiner Verschiebungen der Habitatgrenzen sogar auf saisonaler Ebene ist. Methodisch konzentrierten wir uns auf die Erstellung von MBES-Multifrequenz-Rückstreumosaiken, Winkelantwortkurven und Spektraldaten, kombiniert mit einer intensiven biologischen Probenahme. Multispektralverfahren sind in der optischen

Satellitenfernerkundung seit Dekaden im Einsatz. Mittels speziell designter Indizes lassen sich damit vielfältige Erdbeobachtungen und Umweltanalysen an Land durchführen. Dahingegen gibt es bisher nur sehr wenige Arbeiten, die sich mit dem Potenzial von multispektraler Meeresbodenkartierung befassen, entsprechende akustische Indizes wurden bisher noch gar nicht entwickelt. In ECOMAP konnten erste Arbeiten zu spezifischen Habitaten durchgeführt und – mit Unterstützung unserer KMU Norbit und Innomar – konnte einer der ersten multispektralen Datensätze generiert und analysiert werden (Feldens et al. 2018). Darüber hinaus sind bewegungskompensierte Daten für die Berechnung von Karten spektraler Parameter erforderlich, die aus Rückstreu- und bathymetrischen Daten abgeleitet werden (Schönke et al. 2017) und auch die Methodik der Texturanalyse unterstützen (Feldens 2017).

Für die Multispektralaufnahmen in ECOMAP kam das IOW-eigene Norbit iWBMS-e-Fächerecholot, das im Moonpool von FS *Heincke* und FS *Elisabeth Mann Borgese* montiert wurde, zusammen mit einem Applanix SurfMaster-Trägheitsnavigations- und Lagesystem zum Einsatz. Für die drei Vermessungen im Bereich Sylter Außenriff in der Nordsee und der Mecklenburger Bucht in der Ostsee wurden die Frequenzen 200, 400 und 600 kHz verwendet und das Surveygebiet dreifach überfahren (Anmerkung: Mittlerweile ist eine Multispektralaufnahme mit nur einem Sur-

vey technisch möglich). EGNOS-Korrekturdaten wurden empfangen, um die Navigation auf 0,5 m Genauigkeit zu verbessern. Es wurde zudem angestrebt, die Surveylinien exakt zu wiederholen. Wir registrierten die Rückstreustärke mit Hypack 2016. Die Verarbeitung konzentrierte sich auf die Beseitigung der in den Daten vorhandenen Winkelabhängigkeiten durch Anwendung einer winkelabhängigen Verstärkung (AVG) und den Vergleich der relativen Rückstreuwerte zwischen den Frequenzen. Die Korrektur der Winkelabhängigkeit muss sehr exakt erfolgen, da bereits kleine, in den Einzelfrequenzmosaiken nicht sichtbare Artefakte in den Multifrequenzaufnahmen deutlich erkennbar sind (Abb. 5). Aufgrund der Frequenzabhängigkeit von akustischer Absorption in Wasser muss eine Korrektur erfolgen. Hierfür berechneten wir die Absorptionskoeffizienten gemäß der vorherrschenden Temperatur und des Salzgehaltes. Die Intensitäten der Rückstreuung wurden normalisiert und linear auf ein Graustufenmosaik mit einer Auflösung von 0,3 m dargestellt. Die endgültigen Mosaik wurden mit einem 3 × 3-Box-Mittelwertfilter gefiltert. Multifrequenzmosaiken wurden durch Verwendung von drei Monofrequenz-Graustufenmosaik als Eingangskanäle eines RGB-Bildes mit Open-Source-GIS-Software erstellt (gdal). Die 200-kHz-Frequenz stellt den roten Kanal dar, die 400-kHz-Frequenz den grünen Kanal und die 600-kHz-Frequenz den blauen Kanal.



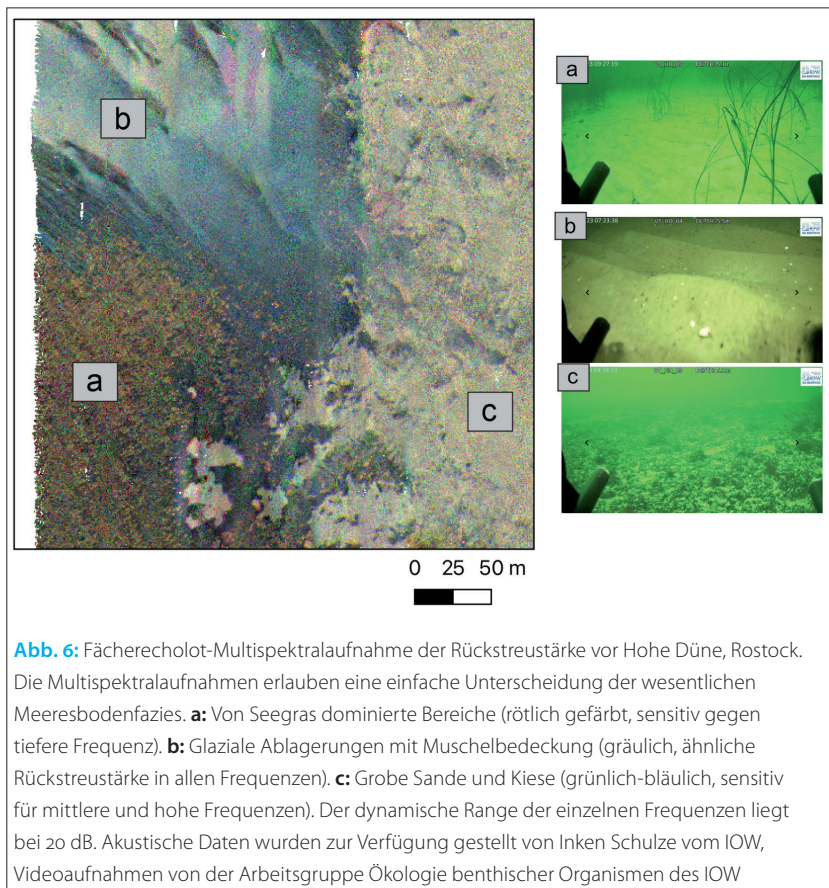


Abb. 6: Fächerecholot-Multispektralaufnahme der Rückstreustärke vor Hohe Düne, Rostock. Die Multispektralaufnahmen erlauben eine einfache Unterscheidung der wesentlichen Meeresbodenfazies. **a:** Von Seegras dominierte Bereiche (rötlich gefärbt, sensitiv gegen tiefere Frequenz). **b:** Glaziale Ablagerungen mit Muschelbedeckung (gräulich, ähnliche Rückstreustärke in allen Frequenzen). **c:** Grobe Sande und Kiese (grünlich-bläulich, sensitiv für mittlere und hohe Frequenzen). Der dynamische Range der einzelnen Frequenzen liegt bei 20 dB. Akustische Daten wurden zur Verfügung gestellt von Inken Schulze vom IOW, Videoaufnahmen von der Arbeitsgruppe Ökologie benthischer Organismen des IOW

Im Allgemeinen wurde festgestellt, dass niedrigere Frequenzen eine bessere Empfindlichkeit für Unterschiede in der Zusammensetzung feinsandiger und schluffiger Ablagerungen aufweisen (Feldens et al. 2018). Dies wurde durch die zunehmende Volumenstreuung in diesen Sedimenten bei niedrigeren Frequenzen erklärt, was die Unterschiede zwischen den Lebensräumen (z. B. Veränderungen im Niveau der Bioturbation bei ansonsten sedimentologisch homogenem Sediment) bei diesen niedrigen Frequenzen hervorhebt (Abb. 5). Die Bedeutung der Bioturbation für die akustische Streuung sowohl im Volumen als auch an der Oberfläche wurde durch Laborexperimente bestätigt, die den Einfluss von Röhrenwürmern, vergrabenen Muscheln und Muschelfragmenten, aber auch von Bioturbationsspuren in feinkörnigen Sedimenten bei Frequenzen über 100 kHz zeigen (Schönke et al. 2019; noch unveröffentlichte Daten von Inken Schulze, IOW). Auch für abiotische Habitate bietet die Multispektralanalyse Vorteile (Abb. 6). Als Beispiel sei hier angeführt, dass – im Gegensatz zu den durch Volumenstreuung beeinflussten biologischen Parametern in feinkörnigen Sedimenten – ökologisch wertvolle Grobsande und Kiesgrunde deutlich besser in hochfrequenten Mosaiken erkennbar sind (noch unveröffentlichte Daten von Inken Schulze, IOW; Abb. 6). Ein weiteres mikrobiell geprägtes Habitat in der Ostsee stellen die anoxischen Becken dar. Auch hier ist mittels multispektraler MBES-Auf-

nahmen eine verbesserte flächige Kartierung möglich (Schneider von Deimling et al. 2013).

Die Aufnahme von Multifrequenzmosaiken im praktischen Einsatz setzt eine simultane Aufzeichnung aller Frequenzen (sodass keine Verluste in der Auflösung der Karten entstehen) sowie kalibrierte Messdaten voraus. Erste entsprechende Fächerecholotsysteme sind derzeit am Markt verfügbar (z. B. Norbit STX). Softwarelösungen für die Anfertigung von Multifrequenzmosaiken sind dagegen in kommerziell verfügbare Softwarepakete integriert (z. B. FMGT, SonarWiz).

Habitatkartierung im Zeitalter der künstlichen Intelligenz

Eines der meistdiskutierten Themen im Bereich der submarinen Habitatkartierung ist die automatische Habitatklassifizierung und Objektdetektion. In den letzten Jahrzehnten wurden viele Ansätze in Betracht gezogen und verschiedene Klassifizierungstechniken implementiert. Diese Ansätze funktionieren oft gut in begrenzten Testgebieten, lassen sich jedoch in der Praxis oft nur schwierig anwenden, was hauptsächlich auf die Komplexität der Meeresbodenhabitate sowie der hydroakustischen Kartierung zurückzuführen ist. Daher war der Blick eines Experten auf die Daten und ihre Interpretation für die akustische Habitatklassifizierung bisher meist unerlässlich. Seit einigen Jahren werden mit zunehmendem Erfolg automatisierte Verfahren unter Zuhilfenahme künstlicher Intelligenz vorgestellt. Insbesondere überwachte maschinelle Lernverfahren ermöglichen es heute, die Erfahrung des Experten in Datenmodelle zu integrieren und somit die menschliche Stärke von der Interpretation zu bewahren, aber dennoch automatisiert zu klassifizieren. Einige Beispiele hierzu finden sich in der letzten Ausgabe dieser Zeitschrift (HN 119) und wurden von den verschiedenen Arbeitsgruppen in ECOMAP publiziert (Janowski et al. 2018; Held und Schneider von Deimling 2019; Feldens et al. 2021). Mit schnellen Computern und Hochleistungsgrafikkarten wird die Analyse großer Datensätze möglich. Insbesondere bei der Durchforstung hochdimensionaler Datensätze ist ein Mensch den Computern hoffnungslos unterlegen. In ECOMAP konnten wir durch mehrere Studien zeigen, dass sich Habitate wie Seegraswiesen, Steinvorkommen, Gebiete mit unterschiedlichen Korngrößen durch gute Datenmodelle klar trennen lassen. Unsere Daten deuten an, dass selbst kleinskalige Änderungen wie Bewuchs von Fadenalgen ihren Abdruck in akustischen Daten hinterlassen könnten. In ECOMAP implementierten wir daher verschiedene Ansätze zur Auswertung von Fächerecholotdaten unter Einbindung maschineller Lernverfahren (random forests, k-means, neuronale Netze) für verschiedene Habitate und Daten und untersuchten darüber hinaus, welche Datenmerkmale möglicherweise für die gegebene geo-

bioakustische Umgebung prädiktiv sein könnten. Es ist seit Langem bekannt, dass die Bathymetrie selbst einer der wichtigsten Prädiktoren für verschiedene Arten und Lebensräume ist. Auch dies war ein Grund dafür, im Rahmen von ECOMAP bevorzugt die Fächerecholottechnologie einzusetzen, da sie die Möglichkeit bietet, genaue Bathymetrie zu erfassen und moderne Snippet-Side-Scans zu co-registrieren. Dadurch konnten wir neue Merkmale wie spektrale Ableitungen der Bathymetrie und Eigenwertmerkmale generieren, welche die Morphologie und Punktwolkenverteilung charakterisieren. Insgesamt wurden mehr als 40 Parameter abgeleitet. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Erstellung hochdimensionaler Datensätze und die Einrichtung von Datenwürfeln und anschließende Auswertung mit Techniken des maschinellen Lernens erstaunliche Ergebnisse liefern und zu einer zuverlässigen und sensitiven Lebensraumkartierung führen können (Abb. 7). Die Bedeutung verschiedener Merkmale wurde bewertet. Die beiden wichtigsten Prädiktoren waren hier die Rückstreuintensität, die acht nachfolgenden Prädiktoren waren jedoch allesamt bathymetrischer Natur (Janowski et al. 2018). Daher ist anzunehmen, dass die Bathymetrie bzw. Morphologie des Meeresbodens in ihren unterschiedlichen Ausprägungen von entscheidender Bedeutung für die Entstehung spezifischer Lebensräume ist. Folglich erachten wir die Bedeutung hydrographischer Messungen für die Habitatkartierung als hoch.

Ausblick

Unsere Ergebnisse zeigen Fallbeispiele, um neuartige Verfahren zu demonstrieren. Wir stehen in direktem Kontakt mit den Behörden, um zu erörtern, welche Verfahren möglicherweise zur verbesserten Kartierung und Überwachung von marinen Lebensräumen angewendet werden könnten. Dagehingehend wurden Nachfolgeprojekte generiert, in denen wir anstreben, die Verfahren zu optimieren.

Untersuchungen mit dem Ziel einer verlässlichen Fernerkundung von Seegraswiesen und Kelpwäldern werden von der CAU in dem Verbundprojekt sea4soCieTy weiterentwickelt, welches im Rahmen der Ausschreibung der Deutschen Allianz für Meeresforschung (DAM, www.cdmare.de) »Blue Carbon – Ansätze zur Steigerung der CO₂-Aufnahme und -Speicherung« für drei Jahre gefördert wird. EOMAP führt seine Entwicklungen zu Cloud-basierten Flachwasser-Kartierungsdiensten mit Satellitendaten im Rahmen des 45 EU-H2020-Projektes zusammen mit Industriepartnern (Fugro, QPS) und hydrographischen Behörden weiter. Die entsprechende Übertragung auf moderne drohnen-gestützte Lösungen wurde kürzlich aus Mitteln des Nationalen Masterplans Maritime Technologien (NMMT) des BMWi begonnen. Die Erfahrungen im Hinblick auf die KI-Verarbeitung akustischer Daten sind in das Projekt ATLAS eingeflossen, in dem am IOW von 2019 bis 2021 große Gebiete der Küstengewässer Mecklenburg-Vorpommerns geologisch und biologisch kartiert wurden. Folgeprojekte be-

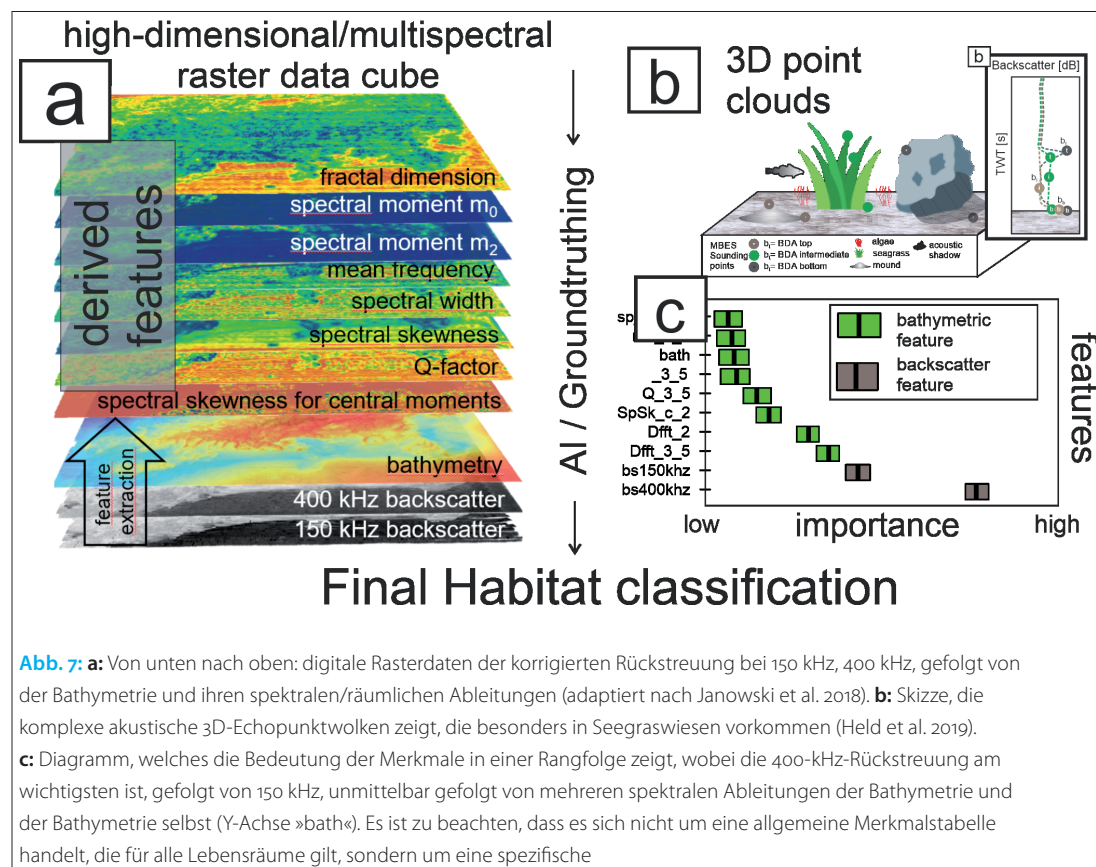


Abb. 7: **a:** Von unten nach oben: digitale Rasterdaten der korrigierten Rückstreuung bei 150 kHz, 400 kHz, gefolgt von der Bathymetrie und ihren spektralen/räumlichen Ableitungen (adaptiert nach Janowski et al. 2018). **b:** Skizze, die komplexe akustische 3D-Echopunktwolken zeigt, die besonders in Seegraswiesen vorkommen (Held et al. 2019). **c:** Diagramm, welches die Bedeutung der Merkmale in einer Rangfolge zeigt, wobei die 400-kHz-Rückstreuung am wichtigsten ist, gefolgt von 150 kHz, unmittelbar gefolgt von mehreren spektralen Ableitungen der Bathymetrie und der Bathymetrie selbst (Y-Achse »bath«). Es ist zu beachten, dass es sich nicht um eine allgemeine Merkmalstabelle handelt, die für alle Lebensräume gilt, sondern um eine spezifische

finden sich in Vorbereitung, unter anderem mit Einbindung des Ocean Technology Campus Rostock. Weitere Forschung und Entwicklung wird notwendig sein, um die Nutzbarkeit von akusti-

schen Multispektraldaten zu erhöhen und Verfahren unter Einbindung intelligenter Algorithmen zu optimieren für eine verbesserte Habitatkartierung in naher Zukunft. //

Literatur

- Feldens, Peter (2017): Sensitivity of texture parameters to acoustic incidence angle in multibeam backscatter. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, DOI: 10.1109/LGRS.2017.2756258
- Feldens, Peter; Inken Schulze et al. (2018): Improved interpretation of marine sedimentary environments using multi-frequency multibeam backscatter data. Geosciences, DOI: 10.3390/geosciences8060214
- Feldens, Peter; Patrick Westfeld et al. (2021): Automatic detection of boulders by neural networks. Hydrographische Nachrichten, DOI: 10.23784/HN119-01
- Fritz, Christine; Katja Dörnhöfer et al. (2017): Mapping submerged aquatic vegetation using RapidEye satellite data: the example of Lake Kummerow (Germany). Water, DOI: 10.3390/w9070510
- Gross, Felix; Kilian Etter et al. (2020): Shallow water UAV based habitat monitoring of seagrass meadows in the Baltic Sea. EGU, Vienna online, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-7510
- Hartmann, Knut; Kim Knauer et al. (2019): Aus der Ferne in die Tiefe – Kartierung der Schleswig-Holsteinischen Ostsee durch Satellitendatenanalysen. Hydrographische Nachrichten, DOI: 10.23784/HN113-09
- Heege, Thomas; Clivia Häse et al. (2003): Airborne multi-spectral sensing in shallow and deep waters. Backscatter, 14, S. 17–19
- Held, Philipp; Jens Schneider von Deimling (2019): New Feature Classes for Acoustic Habitat Mapping – A Multibeam Echosounder Point Cloud Analysis for Mapping Submerged Aquatic Vegetation (SAV). Geosciences, DOI: 10.3390/geosciences9050235
- Janowski, Lukasz; Karolina Trzcinska et al. (2018): Nearshore benthic habitat mapping based on multi-frequency, multibeam echosounder data using a combined object-based approach: A case study from the Rowy site in the southern Baltic Sea. Remote Sensing, DOI: 10.3390/rs10121983
- Kuhwald, Katja; Jens Schneider von Deimling et al. (2021): How can Sentinel-2 contribute to seagrass mapping in shallow, turbid Baltic Sea waters? Remote Sensing in Ecology and Conservation (in Begutachtung)
- Lübmann, Julia-Felicitas (2019): Hydroakustische Untersuchung der Seegrasswiesen in der Kolberger Heide. Master-Thesis, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 135 S.
- Niemeyer, Joachim; Yujin Song et al. (2015): Untersuchungen zum Einsatz der Laserbathymetrie in der Seevermessung. Projektbericht, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Leibniz-Universität Hannover, 96 S.
- Schneider von Deimling, Jens; Wilhelm Weinrebe et al. (2013): A low frequency multibeam assessment: Spatial mapping of shallow gas by enhanced penetration and angular response anomaly. Marine and Petroleum Geology, DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2013.02.013
- Schneider von Deimling, Jens; Verner Ernstsen et al. (2020): BONUS ECOMAP final scientific report. Auf Anfrage unter: www.bonusportal.org, 29 S.
- Schönke, Mischa; Peter Feldens et al. (2017): Impact of *Lanice conchilega* on seafloor microtopography off the island of Sylt (German Bight, SE North Sea). Geo-Marine Letters, DOI: 10.1007/s00367-016-0491-1
- Schubert, Philipp; Wolfgang Hukriede et al. (2015): Mapping and modeling eelgrass *Zostera marina* distribution in the western Baltic Sea. Marine Ecology Progress Series, DOI: 10.3354/meps11133
- Straßburger, Chris (2021): Kartierung von Seegrass mit dem Fächerecholot in der Ostsee mithilfe von maschinellem Lernen. Bachelor-Thesis, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 85 S.
- Wallmeier, Carolin (2019). Airborne Bathymetric LiDAR and its Response to the Seagrass *Zostera Marina* in the Kolberger Heide (Western Baltic Sea). Bachelor-Thesis, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 45 S.