

Vorhaben	MATE-Hyper Maritime Traffic Emissions: Hyperspectral sensing of plastic and soot on the sea surface
Titel	Abschlussbericht
Förderkennzeichen	03SX518B
Zuwendungsempfänger	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH Marie-Curie-Straße 1 26129 Oldenburg,
Ausführende Stelle	DFKI GmbH – Marine Perception, Oldenburg
Projektleiter	Dr. Frederic Stahl, Oliver Ferdinand
Bewilligungszeitraum	01.08.2020 - 31.01.2024
Autoren	Oliver Ferdinand, Andrej Lejman, Dr. Christoph Tholen, Dr. Frederic Stahl, Dr. Holmer Hensen, Navya Prakash, Wolfram Michael Butter
Erstellungsdatum:	15. Juli 2024

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03SX518B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
Abkürzungsverzeichnis	3
Einleitung	5
1 Kurzdarstellung nach NKBF 98 8.2 I (2 Seiten)	5
1.1 Aufgabenstellung	5
1.1.1 Technische und/oder wissenschaftliche Arbeitsziele	5
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	7
1.4 Wissenschaftlicher und Technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	8
1.4.1 Eigene Vorarbeiten	9
1.4.2 Fachliteratur und verwendete Dokumentationsdienste	10
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
2 Eingehende Darstellung nach NKBF 98 8.2 II	11
2.1 Verwendung der Zuwendung	11
2.1.1 AP2: Messboje mit integrierten Oberflächenskimmer	12
2.1.2 AP3: Entwicklung von Niedrigenergie Head-Unit für smarte Beobachtungssysteme	15
2.1.3 AP4: Hyperspektrale Sensoren für Plastik und Ruß auf der Meeresoberfläche	16
2.1.4 AP7: Beobachtungen von Abgasfahnen und Meeresoberfläche mit Hilfe von Drohnentechnik	25
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	26
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	27
2.4 Verwertbarkeit	28
2.4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	28
2.4.2 Wissenschaftliche Erfolgsaussichten	28
2.4.3 Wissenschaftlich-wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	29
2.5 Bekannt gewordener Fortschritt	31
2.6 Veröffentlichungen	32
3 Fazit und Ausblick	33
Literaturverzeichnis	24

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übergeordnetes MATE-Gesamtvorhaben mit allen Arbeitspaketen (AP). Das hier beschriebene Vorhaben MATE-Hyper behält diese Struktur bei und fokussiert sich auf das AP 4, mit weiteren Arbeitsanteilen in AP 2, AP 3 und AP 7.	7
Abbildung 2: Montiertes und integriertes Hyperspektrales Sensorsystem auf der Messboje. Links: Ideenskizze des Systems mit allen notwendigen Sensoren wie in OCEANS 2021 präsentiert, darin (1) RGB-Übersichtskamera, (2) Referenz Radiometer, (3) PTU, (4) Fokus RGB Kamera, (5) Thermal-Kamera, (6) hyperspektrales Radiometer. Mitte: CAD-Zeichnung mit vorgesehenen Sensoren bzw. Gehäusen als Konstruktionsvorschlag. Rechts: Realisierte Version der im September 2023 am Jade-Weser-Port Wilhelmshaven eingesetzten Messboje.	14
Abbildung 3: Flow Chart der Datenerfassung und des Training Prozesses der KI-Algorithmen sowie deren Einbettung in das Datenstrom Management durch ROS.	19
Abbildung 4: Visualisierung des Sensor-Setups in RViz. Mit den RGB-Bildern der Detail- und Übersichtskamera sowie dem Thermalbild von der Thermalkamera. Die Ansteuerung der PTU und des Autofokus von der Thermalkamera findet über das Terminal statt. Unten rechts ist das 3D-Modell mit dem aktuellen Zustand (Schwenk- und Neigewinkel) in der 3D-weltumgebung von RViz dargestellt.	20
Abbildung 5: Datenerfassung von schwimmenden Kunststoffen am Messbecken „SURF“ am ICBM Gelände in Wilhelmshaven. DJI Matrice 210 Drohne (am Boden, weißer Kreis links), weitere Kameras und Radiometer (weißer Kreis rechts oben).	22
Abbildung 6: Sensoren - DJI Matrice (ohne Flug) zur schwimmenden Kunststoffdatenerfassung am SURF-ICBM mit den entsprechenden RGB- und IR-Bildern.	22
Abbildung 7: Oben: DJI MAVIC Enterprise Drohnenkamera montiert auf der Messboje mit schwimmenden Kunststoffen. Unten links: RGB-Bild der integrierten Kamera, dazu unten rechts das entsprechende IR-Wärmebild.	23
Abbildung 8: Beispiel für ein Test-Bild aus den Laborversuchen. Die Erkennung durch YOLOv5 ist als roter Rahmen mit Angabe der Zuverlässigkeit dargestellt.	23
Abbildung 9: Transfer-Learning Ergebnisse mit Laborkunststoffen zur Erweiterung des benutzerdefinierten YOLOv5s MAPO, das zuvor auf ICBM-SURF und Messbojen Einsätzen mit schwimmendem Kunststoff trainiert wurde.	24

Abkürzungsverzeichnis

AHRS	Attitude Heading Reference System
API	Application Programming Interface
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
CAD	Computer-Aided Design
CPU	Central Processing Unit
DFKI	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz
DIN	Deutsches Institut für Normung
FPS	Frames per Second, Bildwiederholrate
HW	Hardware
IMU	Inertial Measurement Unit
KI	Künstliche Intelligenz
MAP	Marine Perception
MP	Megapixels
MTBF	Mean-Time-Between Failures

PAK. Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PTU. Pan-Tilt Unit
ROV Remotely Operated Vehicle
SRR. System Requirement Review
SSD. Solid-State-Drive
URDF. Unified Robot Description Format
WLAN Wireless Local Area Network

Einleitung

Das vorliegende Dokument stellt den Abschlussbericht des Vorhabens MATE-Hyper und wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi, Förderkennzeichen 03SX518B) gefördert.

Dieser Abschlussbericht folgt dabei dem in der Anlage 2 zum NKBF 98 gegebenen Muster. In Kapitel 1 wird eine kurze Darstellung des Projektes gemäß Punkt I gegeben, Kapitel 2 stellt die inhaltlichen Entwicklungen in einer eingehenden Darstellung gemäß Punkt II des Musters dar. Die Punkte III (Erfolgskontrollbericht) und IV (Berichtsblatt bzw. Document Control Sheet) werden (durch gesondert abgegebene Dokumente erfüllt.

Die dargestellten Arbeiten umfassen alle vom DFKI geleisteten Arbeiten im Vorhaben „Verbundprojekt: MarTERA MATE - Maritime Traffic Emissions: A monitoring network; Vorhaben: Hyperspectral sensing of plastic and soot on the sea surface (MATE-Hyper)“

1 Kurzdarstellung nach NKBF 98 8.2 I (2 Seiten)

In diesem Kapitel wird zunächst die Aufgabenstellung des Projektes beschrieben mit den technischen und wissenschaftlichen Arbeitszielen (Abschnitt 1.1). Anschließend werden die Voraussetzungen des Vorhabens (Abschnitt 1.2) sowie Planung und Ablauf des Vorhabens (Abschnitt 1.3) behandelt. Es folgen Erläuterungen zum wissenschaftlichen Stand (Abschnitt 1.4) und zur Zusammenarbeit mit anderen Stellen (Abschnitt 1.5).

1.1 Aufgabenstellung

Das Gesamtvorhaben MATE sieht die Entwicklung eines vollständigen Messnetzes an, um eine kontinuierliche Überwachung der Schiffsemissionen in der Atmosphäre und im Wasser zu ermöglichen, einschließlich Ruß- und Ölrückständen, Schwefeloxiden und Plastikmüll. Das Teilvorhaben MATE-Hyper konzentriert sich dabei auf die Entwicklung eines Sensorsystems für Ruß (schwarzer Kohlenstoff) und/oder Plastikmüll auf der Meeresoberfläche. Es wurde ein integriertes, auf künstlicher Intelligenz basierendes System entwickelt, das sichtbare und infrarote Informationen von Videokameras mit geführten hyperspektralen Spotdaten kombiniert. Das System kann sowohl als Erweiterung für Bojen als auch auf statische Plattformen verwendet werden. Die automatisierte Extraktion von Informationen aus diesen komplexen Daten durch maschinelle Lernverfahren wird Vorhersagemodelle für Verschmutzungseigenschaften unterstützen. Die Kombination dieser Daten mit anderen Umweltbeobachtungen soll schließlich zur Integration von Sensorinformationen und zu einer zuverlässigen ganzheitlichen Situationserfassung des marinen Ökosystems führen.

1.1.1 Technische und/oder wissenschaftliche Arbeitsziele

Das hier beschriebene Vorhaben MATE-Hyper wird sich auf die Entwicklung eines neuartigen Sensorsystems für Ruß (schwarzer Kohlenstoff) und Plastikmüll auf der Meeresoberfläche

konzentrieren. Wir schlagen ein integriertes, auf künstlicher Intelligenz basierendes System vor, welches sichtbare und infrarote Videokamerainformationen mit geführten hyperspektralen Spotdaten kombiniert und für Bojen und statische Plattformen konzipiert ist. Die automatisierte Extraktion von Informationen aus diesen komplexen Daten durch maschinelle Lernverfahren wird Vorhersagemodelle für Verschmutzungseigenschaften unterstützen. Die Kombination dieser Daten mit anderen Umweltbeobachtungen wird schließlich zur Integration von Sensorinformationen und zu einer zuverlässigen ganzheitlichen Situationserfassung des marinen Ökosystems führen.

Der Awareness-orientierte und auf künstlicher Intelligenz (KI) basierende Ansatz von MATE-Hyper zielt auf die Entwicklung und Anwendung eines intelligenten, fusionierten Imaging-Spektralsensors ab, um die unmittelbare Umgebung der Bojen-Plattform zu bewerten. Die Bildinformationen einer statischen 360°- oder Weitwinkelkamera werden verwendet, um einen allgemeinen Überblick zu erhalten und interessante Objekte wie Öl- oder Rußflecken, Plastik oder andere potenzielle Verschmutzungen zu identifizieren, indem die KI-Objekterkennung in der Nähe der Plattform eingesetzt wird. Basierend auf dieser allgemeinen Lageerkennung zielt hyperspektrale radiometrische Sensorik auf einzelne Punkte ab, der von einer robotergestützten Pan-Tilt Unit (PTU) gesteuert wird. Die Steuerung dieser Einheit und ihrer Trajektorien erfolgt durch adaptive KI-Optimierungsalgorithme. Das Ergebnis ist eine fusionierte Oberflächeninformation mit automatisch identifizierten Objekten, die spektral analysiert werden. Unter Anwendung des maschinellen Lernens wird die Objektklassifizierung auf geometrische und spektrale Eigenschaften angewendet. Schließlich werden fusionierte Informationen dem Gesamtsystem und dem Endbenutzer zur Verfügung gestellt, um ein umfassendes Bewusstsein für die Umweltsituation in Bezug auf Gefahren und Verschmutzungen auf See zu erreichen.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Arbeitsgruppe Marine Perception des DFKI ist im April 2019 neu gegründet worden. Das Projekt ist mit Covid19-Pandemie gestartet und einen wesentlichen Teil der Projektlaufzeit begleitet, entsprechend auch beeinflusst. Weitere Bedingungen sind die daraus resultierenden Engpässe und Produktabkündigungen, die eine erhebliche Verzögerung der Lieferung des Hauptprojektteils, der Boje selbst, verursacht hat, jedoch auch für die MATE-Hyper-Sensorik an verschiedenen Stellen zu Engpässen in der Beschaffung und der Entwicklung geführt hat. Eine defekte Fokussiereinheit der Fokus-IR-Kamera FLIR A700 hat den Fortschritt für die IR-Kamera-Detektions-Entwicklung um etwa 8 Monate durch Ausfall des Gerätes verzögert. Ähnliches gilt für das Fokus-Radiometer, hier sind es ca. 5 Monate Verzögerung gewesen. Aufgrund der oben aufgeführten Bedingungen wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes um 6 Monate beantragt und durchgeführt

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben begann am 01.08.2020 und endete am 31.07.2023. Die Arbeiten im Projekt MATE-Hyper gliedern sich in Arbeitseinheiten (Tasks oder Aufgaben), welche sich in die Struktur der Arbeitspakete (AP) des übergeordneten MATE-Gesamtvorhabens einfügen (Abbildung 1). Das für MATE-Hyper zentrale Arbeitspaket AP 4 (Hyperspektaler Sensor für Plastik und BC auf der Meeresoberfläche) ist in drei Aufgaben gruppiert. Weitere Arbeitseinheiten binden diese Tätigkeiten in die Bereiche der Systemintegration (AP 2), der Entwicklung der Energieeinheit des Bojensystems (AP 3) und die Flugdrohnensysteme (AP 7) ein.

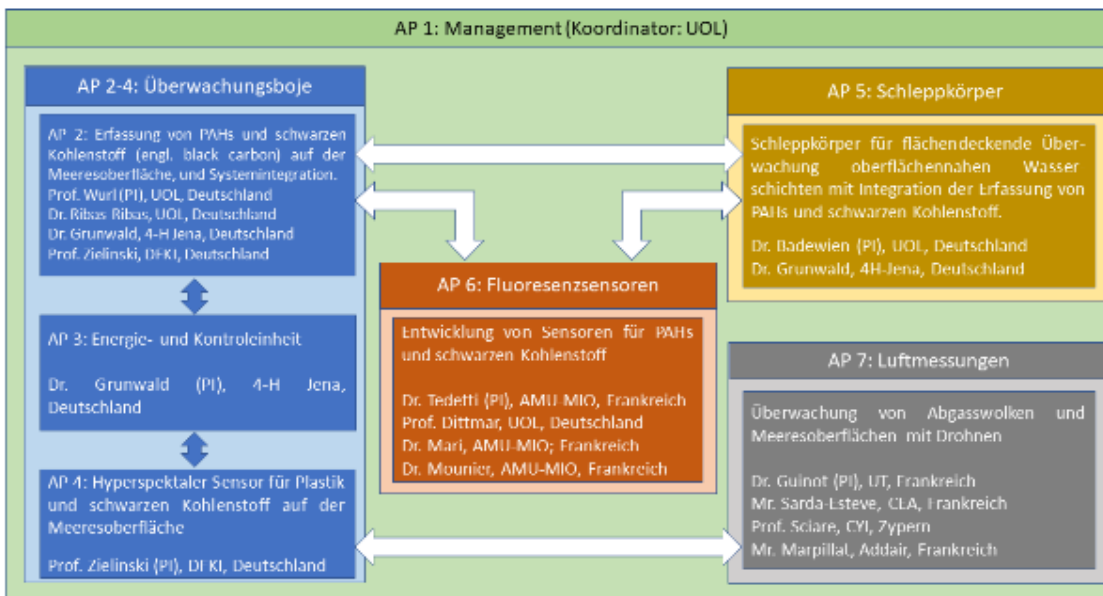


Abbildung 1: Übergeordnetes MATE-Gesamtvorhaben mit allen Arbeitspaketen (AP). Das hier beschriebene Vorhaben MATE-Hyper behält diese Struktur bei und fokussiert sich auf das AP 4, mit weiteren Arbeitsanteilen in AP 2, AP 3 und AP 7.

1.4 Wissenschaftlicher und Technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Die Erkennung von Verschmutzungen auf der Meeresoberfläche, wie z.B. Öl oder Plastikmüll, ist von entscheidendem Interesse für den Schutz der Meeresökosysteme und die Sicherheit menschlicher Aktivitäten (UN, 2019). Es gibt Sensoren, die sich diesen Herausforderungen stellen, wobei multispektrale optische Sensoren besonders prominent auf luftgestützten und satellitengestützten Plattformen sind (Zielinski et al., 2009; Delory & Pearlman, 2018). Während herkömmliche multispektrale Sensoren das radiometrische Signal nur bei einer Handvoll Wellenlängen aufzeichnen, messen hyperspektrale Sensoren das reflektierte Sonnensignal bei Hunderten von aneinandergrenzenden und schmalen Wellenlängenbändern, die vom Sichtbaren bis zum Infrarot reichen (Moore et al, 2009). Hyperspektrale Radiometer werden daher routinemäßig für Messungen der Wasserfarbe eingesetzt (Garaba et al., 2015) und auch mit PTUs im Sonnenverlauf nachgeführt (Vansteenwegen et al. 2019). Durch den Einsatz von Spektrographen und deren Projektion auf CCD-Sensoren, sowie das Abscannen der Fläche entstehen hyperspektrale Bilder, die zumeist nur in niedriger zeitlicher Auflösung zur Verfügung stehen (Bachmann et al. 2019). Hyperspektrale Bilder liefern reichlich spektrale Informationen, um spektral ähnliche (aber einzigartige) Materialien zu identifizieren und zu unterscheiden, und ermöglichen so die richtige Unterscheidung zwischen Materialien mit nur geringen Unterschieden ihrer spektralen Signatur. Hyperspektrale Bilder zeigen daher das Potenzial für die richtige Unterscheidung zwischen Ölteppichen, an der Oberfläche treibenden Objekten und anderen Naturphänomenen; und sogar für die richtige Unterscheidung zwischen Öltypen (Andreoli et al., 2007). In jüngster Zeit hat sich gezeigt, dass die Verwendung von hyperspektralen UV-VIS-IR-Sensoren auch relevante Informationen über die Objektart und die chemische Charakterisierung von Meeresplastik liefert (Garaba et al., 2018). Allerdings sind hyperspektrale Sensoren mit ausreichend räumlicher und spektraler Auflösung sehr kostspielig und produzieren große Datenmengen, was autonome und langfristige Anwendungen einschränkt. So haben (Judd et al., 2013) zum Beispiel in einer militärisch motivierten Studie einen SWIR-Array Sensor mit einer PTU integriert, um so hyperspektrale Bildinformationen zu erzeugen. Die Autoren der Studie verweisen dabei auf den technischen Aufwand und den Bedarf von Algorithmen des maschinellen Lernens, um effizient „Objects of Interest“ klassifizieren zu können. Gesamtlagebilder einer maritimen Umgebung werden derzeit auf der Basis der Fusion multispektraler und multimodaler Sensoren realisiert (Rüssmeier et al., 2016, 2017), ohne die weitergehende Charakterisierung durch hyperspektrale Verfahren zu nutzen. Um diese Einschränkungen zu überwinden, wurde ein integriertes, auf Intelligenz basierendes System auf einer Bojenplattform vorgeschlagen, welches Informationen von sichtbaren und infraroten Videokameras (Leykin et al., 2007) mit geführten hyperspektralen Spotdaten (als an einzelnen, aktiv angesteuerten Punkten) kombiniert. Ein derartiges System existierte nach unserer Internet und Literatur Recherche vom 27.1.2020 nicht.

Die Kombination von zwei 2D-Bildgebungssensoren mit automatischer Merkmalsextraktion und anschließender punktwiser hyperspektraler Untersuchung wird zu einer neuartigen 3D-Spektralkarte führen. Die automatisierte Extraktion von Informationen aus diesen komplexen Daten durch neuronale Netzwerke mit wiederkehrendem oder langem Kurzzeitgedächtnis (LSTM, siehe auch Oehmcke et al. 2017) wird probabilistische Modelle für Verschmutzungsmerkmale unterstützen. Wang et al. (2019) haben kürzlich gezeigt, dass ein auf einem integrierten LSTM basierendes Nachrichtensystem künstlicher Intelligenz unter Verwendung von Kreuzkorrelations- und Assoziationsregeln zur Identifizierung der Eigenschaften von Wasserschadstoffen und zur Verfolgung industrieller Punktquellen von Schadstoffen verwendet werden kann. Die Kombination dieser Daten

mit anderen Umweltbeobachtungen kann schließlich zur Integration von Sensorinformationen in Richtung eines zuverlässigen ganzheitlichen Situationsbewusstseins über die Meeresgesundheit führen.

Schutzrechte, die eine Umsetzung des Vorhabens beeinflussen, bestehen nach unserer Recherche (Google Patents vom 28.01.2020, Kombination von Suchanfragen aus der Menge {hyperspectral, VIS-imaging, IR-imaging, PTU, maritime sensing}) nicht (9 Treffer in der Gesamtkombination, ohne Relevanz/Bezug zu dem hier vorgeschlagenen Vorhaben; Untermengen der Suchbegriffe zeigen weitere Patente ohne Bezug für das vorgeschlagene Vorhaben an). Eine Reihe von einzelnen Technologien in der Sensorik sind naturgemäß patentiert, werden aber mit dem kommerziellen Erwerb der einzelnen Sensorkomponenten abgedeckt. Zum jetzigen Zeitpunkt sehen wir keine Berührung unserer Entwicklungen mit anderen Schutzrechten, primär aufgrund von abgelaufenen Patenten und den Alleinstellungsmerkmalen unserer Entwicklungen.

1.4.1 Eigene Vorarbeiten

Das Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) wurde 1988 als gemeinnützige öffentlich-private Partnerschaft gegründet. Es verfügt über Forschungseinrichtungen in Kaiserslautern, Saarbrücken und Bremen, sowie Labore in Berlin, Darmstadt, Lübeck und Niedersachsen und eine Außenstelle in Trier. Das DFKI ist führend in der innovativen anwendungsorientierten Softwareentwicklung auf der Basis künstlicher Intelligenz. Das DFKI entwickelt Produktfunktionen, die auf anwendungsorientierter Grundlagenforschung basieren. Es erstellt Prototypen und patentierbare Lösungen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik. Forschungs- und Entwicklungsprojekte werden in neunzehn Forschungsabteilungen und -gruppen, acht Kompetenzzentren und acht Living Labs durchgeführt. Eine halbjährliche Begutachtung der staatlich geförderten Projekte des DFKI erfolgt durch ein Komitee von international renommierten Experten.

Das Interesse an der Anwendung von automatisierten und autonomen Sensortechnologien zur Beurteilung des Umwelt- und Situationsbewusstseins im marinen und maritimen Kontext ist in den letzten zehn Jahren stark gestiegen. Zu diesem Zweck widmete sich die DFKI-Forschungsgruppe "Marine Umgebungswahrnehmung" (Marine Perception, Oldenburg) als Teil des neu gegründeten DFKI-Labors Niedersachsen (jetzt Standort Niedersachsen) der wissenschaftlichen Forschung und Entwicklung intelligenter Sensorsysteme, die der Erfassung von Schlüsselinformationen über verschiedene aquatische Umgebungen dienen. Das DFKI-Team in Oldenburg konzentriert sich auf die Etablierung optisch-physikalischer Sensornetzwerke, die in der Lage sind, Gefahren im Meer automatisch zu erkennen und zu klassifizieren. Modernste und klassische Technologien sowie Methoden werden in Synergie gebracht, um eine ganzheitliche Analyse von Multisensordaten zu ermöglichen. Wir führen eine Fusion von Bildern und hyperspektralen Informationen durch, die zu einem hochdimensionalen Situationsbewusstsein führt, das die einzigartige Wahrnehmung von Szenarien ermöglicht. Dieses Bewusstsein ist eine Grundlage für gezielte und adaptive Handlungsweisen autonomer Systeme. Diese von uns entwickelten integrierten Technologien haben ein Anwendungspotenzial in der Offshore-Energieproduktion, der Öl- und Gasexploration, der Polarforschung, der maritimen Sicherheitstechnik, der Meeresforschung und dem Umweltschutz. Weitere Anwendungsbereiche sind mit der Überwachung von Produktionsprozessen und Umweltsituationen von Geschäftsbereichen verbunden, die mit aquatischen Medien wie Wasserversorgung, Aquakultur, Abwassermanagement interferieren.

Als das DFKI-Labor Niedersachsen im April 2019 gegründet wurde, existierten noch keine publizierten Vorarbeiten. Forschungsvorhaben, wie z.B. die Detektion von Plastikmüll aus Flugdrohnenaufnahmen auf Flüssen in Kambodscha, die im Auftrag der Weltbank durchgeführt wurden, waren zur Zeit der

Antragsstellung noch in der Durchführungm Gang. Weitere Vorhaben, z.B. zur informationstechnischen individuellen Zuordnung (Anchoring) von Objekten in verschiedenen Umgebungen, wurden zu dem Zeitpunkt gerade begonnen (BMBF Vorhaben CoPDA – Comprehensive Perception and Dynamic Anchoring). Der Antragsteller der Forschungsgruppe Marine Perception konnte jedoch auf seine langjährige Erfahrung im Rahmen seiner Tätigkeiten am ICBM der Universität Oldenburg und vorheriger Tätigkeiten in der Meeresforschungstechnik und Umweltsensorik zurückgreifen.

1.4.2 Fachliteratur und verwendete Dokumentationsdienste

Die verwendete Fachliteratur ist im Literaturverzeichnis angegeben.

1.5 -Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es bestand stets eine gute Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern. Besonders häufiger Austausch und reguläre Projektmeetings bestanden mit der Universität Oldenburg, insbesondere dem ICBM in Wilhelmshaven, zwecks Integration des vom DFKI entwickelten Sensorsystems in die Messboje für eine Messkampagne im September 2023.

2 Eingehende Darstellung nach NKBF 98 8.2 II

Die folgenden Abschnitte beschreiben eingehend die vorgenommenen Arbeiten und Untersuchungen im Vorhaben „**MATE-Hyper** - Maritime Traffic Emissions: Hyperspectral sensing of plastic and soot on the sea surface“ sowie deren Ergebnisse.

2.1 Verwendung der Zuwendung

Das Vorhaben MATE-Hyper ist am 01.08.2020 gestartet und nach kostenneutraler Verlängerung auf Antrag am 31.01.2024 beendet worden. Die Arbeiten im Projekt MATE-Hyper gliedern sich in Arbeitseinheiten (Tasks oder Aufgaben), welche sich in die Struktur der Arbeitspakete (Work Packages) des übergeordneten Gesamtvorhabens einfügen (Abbildung 1, siehe oben).

Eine Reihe von Meeresverschmutzungen sind signifikant an der Meeresoberfläche vorhanden, da sie durch den Auftrieb aufrechterhalten werden. Die oberen und oberflächennahen Schichten des Meeresswassers können mit Öl oder Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) angereichert sein (Zielinski et al., 2009) sowie Rußflecken (Lim et al., 2007). In jüngster Zeit ist mariner Schutt und vor allem Plastik zu einem globalen Problem geworden, das auch in einer ersten Anwendung durch luftgestützte Fernerkundung angegangen wurde (Garaba et al., 2018). Die Fernerkundung selbst ist ein bewährter und weit verbreiteter Ansatz zur Ölüberwachung aus Flugzeugen und Satelliten (Zielinski et al., 2009). Allerdings sind diese Plattformen mit einigen Nachteilen verbunden, die sie nicht für eine dauerhafte Überwachung von Meeresgefahren in Küstengebieten oder sogar in einer von Menschen beeinflussten Umgebung eignen, wie z.B. Häfen. Die räumliche Auflösung der Satellitendaten ist in vielen Fällen nicht ausreichend und ihre zeitliche Abdeckung ist noch schlechter. Hinzu kommt, dass Merkmale, die eine optische Untersuchung erfordern, hinter Wolken verborgen sein können. Die luftgestützte Fernerkundung kann einige dieser Mängel ausgleichen, jedoch ist ihr Betrieb kostspielig und erfordert einen hohen logistischen Aufwand, sodass ein langfristiger Betrieb nicht in Reichweite ist. Bemerkenswert ist, dass der Drohnenbetrieb, wie im Projekt vorgeschlagen, einfacher zu handhaben ist und flexibler in seinem Betrieb, dennoch ist er ereignisgesteuert und keine Lösung für eine 24/7 Überwachung. Daher wurde in MATE-Hyper eine verankerte Plattform für die Umweltüberwachung als Lösung verfolgt.

Ziel für MATE-Hyper:

Im Rahmen von MATE-Hyper sollte ein integriertes, auf KI basierendes System entwickelt werden, das statische Kamerainformationen mit geführten hyperspektralen Spotdaten kombiniert. Dieser KI gestützte Ansatz zielt ab auf die Entwicklung und Anwendung eines intelligenten fusionierten Imaging-Spektralsensors zur Beurteilung der unmittelbaren Umgebung der vertäuten Plattform (aber auch auf andere Oberflächenplattformen anwendbar). Die Bildinformationen einer statischen 360°- oder Weitwinkelkamera werden verwendet, um einen allgemeinen Überblick zu erhalten und interessante Objekte wie Öl- oder Rußflecken, Trümmer oder andere potenzielle Verschmutzer mit Hilfe von KI-

basierter Objekt Identifikation in der Nähe der Plattform zu identifizieren.

Basierend auf dieser allgemeinen Situationsübersicht wird ein hyperspektraler (Strahldichte-) Sensor (der den UV-VIS-NIR-Bereich abdeckt) auf einzelne Punkte ausgerichtet, die von einem Schwenk-Neige-Roboter angesteuert werden. Die Steuerung dieser Einheit und ihrer Bahnen erfolgt durch adaptive KI-Optimierungsalgorithmen. Das Ergebnis ist eine Oberflächeninformation mit automatisch identifizierten Objekten, die spektral analysiert werden können. Unter Anwendung aktueller maschineller Lernverfahren, Objekt Klassifizierung auf geometrische und spektrale Eigenschaften wird erreicht, dass fusionierte aggregierte Informationen dem Gesamtsystem und dem Endnutzer zur Verfügung gestellt, um Umweltsituationen in Bezug auf Gefahren und Schadstoffe an der Meeresoberfläche erfassen zu können.

Herausforderungen bei der Nutzung dieser Plattformen sind der begrenzte Blickwinkel, der eine lokalere Perspektive bedeutet, und die geringere Flexibilität bei einer Verlagerung der Sensoren. Um die Ziele zu erreichen, werden drei Arten von Sensoren in ein einziges System integriert. Dies sind:

- a) bildgebende Sensoren für den sichtbaren und infraroten Spektralbereich, modifiziert durch Weitwinkelobjektive zur Abdeckung eines großen Interessengebietes und
- b) ein mit einer PTU betriebenes Hyperspektral-Radiometer mit einem engen Sichtfeld zur Untersuchung ausgewählter Orte (Objekte von Interesse und potenzielle Schadstoffe). Aus diesen kombinierten Informationen werden Klassifikationen und die Wahrscheinlichkeit von Kontamination abgeleitet. Das geschieht mithilfe von maschinellen Lernansätzen, die zeitabhängige Muster erkennen trainieren und wieder vergessen können. Das für MATE-Hyper zentrale Arbeitspaket ist damit AP4 „Hyperspektraler Sensor für Plastik und Ruß auf der Meeresoberfläche“, der in drei Aufgaben gruppiert wurde. Weitere Arbeitseinheiten binden diese Tätigkeiten in die Bereiche der Systemintegration (AP2), der Entwicklung der Energieeinheit des Bojensystems (AP3) und die Flugdrohnensysteme (AP7) ein.

2.1.1 AP2: Messboje mit integrierten Oberflächenskimmer

Ziel in AP2 ist die Messung von gelöstem schwarzen Kohlenstoff und gelösten polyaromatischen Kohlenwasserstoffen in möglichst dünnen Oberflächenschichten von Küstengewässern entlang Schifffahrtswegen bzw. Häfen. Neben der Konstruktion eines Skimmers (Task 2.1, ohne Beteiligung des DFKI) ist die weitere Aufgabe die Systemintegration (Task 2.2, mit Beteiligung des DFKI). Hier werden alle entwickelten Technologien der verschiedenen Arbeitspakete zu einem integrierten Beobachtungssystem zusammenführen. Es beinhaltet die Modifikation einer kommerziellen Boje, um ausreichend Platz für jede Komponente zu schaffen, eine einfache Wartung mit "plug+work"-Einheiten und die Entwicklung von Verfahren für das sichere Ausbringen und Bergen der modifizierten Boje. Aufgabe für das DFKI war hier Aufgabe 1.2 – Systemintegration des MATE-Hyper-Sensorsystems in die gemeinsame Messplattform „Boje“. Diese Aufgabe umfasst die endgültige Integration der Komponenten bzw. Teilsysteme der Arbeitspakete zu einem kompletten Gesamtsystem. Die Aufgabe wurde vom MATE-Team durchgeführt und stellt eine wesentliche Schnittstelle zwischen den Partnern dar.

Um ein möglichst integriertes Beobachtungsnetzwerk als Demonstrator zu erzeugen, wurde das in AP4 entwickelte und gebaute System im August / September 2024 final in die Messboje integriert. In Absprache mit den wichtigsten Partnern für dieses Systemteil (Uni Oldenburg und 4H-Jena) wurde in mehreren Phasen abgestimmt, welche die zentralen Komponenten und Schnittstellen zur Erzeugung eines möglichst voll-kompatiblen Systems sind. Diese waren in Reihenfolge der Priorität

- 1) Energieversorgung für die Sensoren, PTU und Rechner Einheiten,
- 2) Mechanische Befestigungsmöglichkeiten, und
- 3) Datenstromintegration.

Da, wie im Antrag bereits genannt, dieses den letzten Schritt im Entwicklungsprozess des Projektes darstellt, geschah dieser Prozess erst, sobald die Funktionalität aller zuvor und separat getesteten Komponenten in Bezug auf Hardware, Software und Handhabung abgeschlossen wurde.

Die in AP4 vorgestellte Software- und Hardwarelösung wurde in allen Teilen daher intensiv im Labor vor der Integration getestet. Hierbei wurden nach Möglichkeit reale Bedingungen nachgebildet. Neben den Verzögerungen in der Verfügbarkeit und späteren Lieferung von Komponenten, teilweise Integrationsarbeit mit alternativen Komponenten, ist die Laborphase erfolgreich abgeschlossen worden. Da die Testphase des integrierten Systems dadurch jedoch verkürzt war (effektiv ein realer Test erst zur Zeit der Demonstrationsphase stattfinden konnte) konnte das Gesamtsystem noch nicht erfolgreich genutzt werden.

Abbildung 2 zeigt das Sensorsystem in allen drei Phasen der Projektlaufzeit. Neben der Ideen Skizze eines Systems mit den notwendigen zu integrierenden Sensoren ist mittig die endgültige Zeichnung zur Produktion bzw. Beschaffung aller mechanischen Komponenten gezeigt (detaillierte Beschreibung siehe AP4). Gleichzeitig stellt es die räumliche Zusammenstellung der Sensoren dar, über die ein optimales Ergebnis der Wahrnehmung aller Sensoren erzielt werden kann. Die Referenzkamera (1) wurde, anders als zunächst geplant, direkt mit der Boje oberhalb des PTU-Fokus-Systemteils verbunden und so konfiguriert, dass es einen möglichst weiten Bereich erfassen kann. Das Referenzradiometer (2) wiederum wurde on-shore aufgestellt: Es dient hauptsächlich der Erfassung des verfügbaren Lichtspektrums und gleichzeitig der Gesamtintensität. Dabei ist wichtig, dass keine „Verfälschung“ des Spektrums entsteht. Dies kann etwa durch „farbige“ Objekte im Erfassungsbereich des Sensors (Halbkugel oberhalb des Messkopfes) geschehen. Erfolgen könnte dieses bei Betrieb auf der Boje durch Wellenbewegungen, die die Boje signifikant zu Seite kippen ($\geq 5^\circ$ Abweichung zur Lotrechten). Da dieses zu erwarten ist bei einem durch den Tidengang beeinflussten Gewässer, wurde auf einen Betrieb offshore direkt verzichtet. Die auf der PTU (3) montierten Fokus-Sensoren Fokus RGB Kamera (4), Thermal-Kamera (5) und Radianz-Radiometer (6) wurden seitlich auf der Rotationsachse der PTU montiert, um (a) die Rotationsalgorithmen einfacher zu halten, und (b) die Montage selbst günstiger sowohl in Bezug des Bojen Schwerpunktes zu halten als auch den potenziell durch das Gestänge der Boje verdeckten Bereiches zu minimieren. Ein eigens konstruierter Dom aus Edelstahl diente der sicheren Montage des MATE-Hyper-Sensorik auf dem Bojenturm sowie der sicheren und wasserdichten Kabeldurchführung zur Rechereinheit im Inneren des Turms.

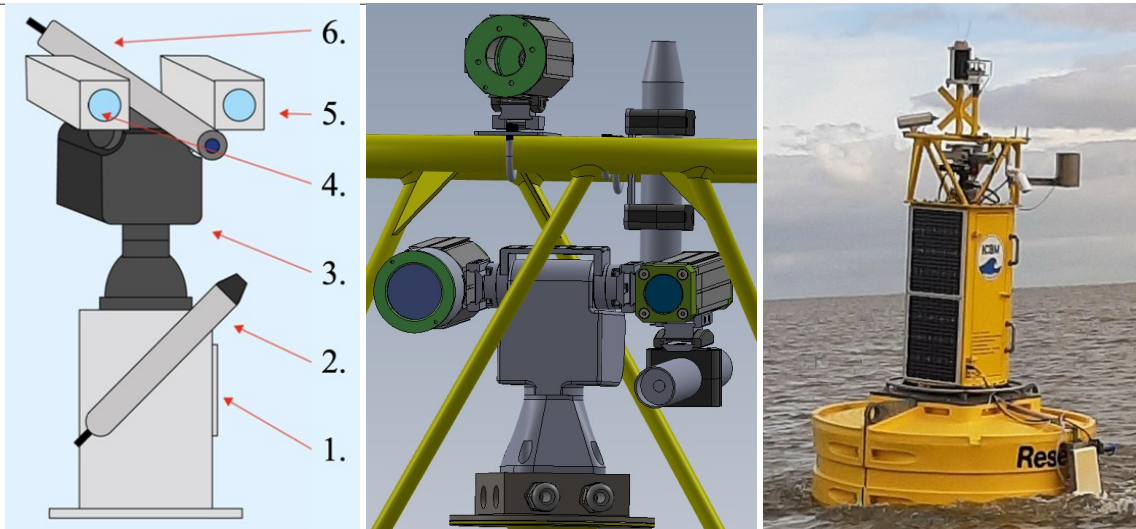


Abbildung 2: Montiertes und integriertes Hyperspektrales Sensorsystem auf der Messboje. Links: Ideenskizze des Systems mit allen notwendigen Sensoren wie in OCEANS 2021 präsentiert, darin (1) RGB-Übersichtskamera, (2) Referenz Radiometer, (3) PTU, (4) Fokus RGB Kamera, (5) Thermal-Kamera, (6) hyperspektrales Radiometer. Mitte: CAD-Zeichnung mit vorgesehenen Sensoren bzw. Gehäusen als Konstruktionsvorschlag. Rechts: Realisierte Version der im September 2023 am Jade-Weser-Port Wilhelmshaven eingesetzten Messboje.

Es konnte ein erfolgreicher Betrieb des Systems über das Bojen-eigene Bordspannungsnetz inklusive der Solaranlage erzielt werden. Alle Systemteile funktionieren nach kurzer Rechner Boot Phase von <60 Sekunden autark und erfassen alle Daten in einem gemeinsamen Datenstrom. Der Leistungsbedarf des MATE-Hyper-Systems ist trotz der Verwendung einer kommerziellen verfügbaren PTU-Einheit geringer als in der Anfangsphase erwartet. Neben den durchgehend stabilen Bewegungen der PTU konnte diese trotz mechanischer Belastung durch Wellenbewegungen oder externer Lasten (etwa Personen auf Tonnenkörper bei Wartungsbetrieb) stabil halten, solange die Batteriespannung ausreichend war. Die Gesamt-mechanische Belastung der Boje durch das MATE-Hyper-System konnte trotz der Verwendung einer kommerziellen verfügbaren PTU-Einheit reduziert werden. Dies gelang zum einen durch Gewichtseinsparungen in der Behausung der Sensoren (Aluminiumgehäuse verwendet anstelle von Edelstahl) und der Rechner-Schaltkasten (Kunststoff statt Stahl, möglich durch Integration in den Bojenturm, zum anderen aber auch durch die niedrigere Positionierung des Anbaus innerhalb des oberen Turmkäfiges anstatt der Montage auf einer der beiden oberen Plattformen. Der Schwerpunkt der Boje, relevant für die Stabilität bei Wellenbewegungen, wurde dadurch so gering wie möglich beeinflusst. Während der Laufzeit der Demonstration innerhalb der finalen MATE-Kampagne im September 2023 konnten Datenaufnahme mit RGB Zoom Kamera und IR-Kamera erfolgreich absolviert werden. Gleichzeitig konnten Daten mit beiden Radiometern, also sowohl die Referenz- als auch Spotdaten des Fokus-Radiometers erfolgreich aufgenommen werden.

2.1.2 AP3: Entwicklung von Niedrigenergie Head-Unit für smarte Beobachtungssysteme

Für MATE-Hyper stellt dieses Arbeitspakete eine relevante Schnittstelle zum Gesamt-MATE-System für das AP4 dar. Entsprechend sind hier nur Ziele übernommen, die einen Bezug zu MATE-Hyper haben. Die übergreifenden Ziele des Arbeitspaktes sind die Entwicklung einer Niedrigenergie-Haupteinheit sowie einer energieerzeugenden Lösung für vertäute off-shore Beobachtungssysteme, z.B. Bojen. Die Einheit besteht aus einem zentralen Computer, der die Sensoren (hier MATE-Hyper Sensorik) integriert, nach Vorgabe steuert, den Datenstrom verwaltet, die Daten der Sensorik speichert und ggf. in nahezu Echtzeit an eine dazu einzurichtende Station an Land sendet.

Die Kopfeinheit eines Verankerungssystems stellt das Herz und das Gehirn einer Station in Bezug auf Energieversorgung, -management und -verteilung sowie Datenmanagement dar.

Die Technologien in Bezug auf die Datenverarbeitung dieser Systeme werden in Richtung Niedrigenergiesysteme optimiert, um für Anwendungen an Verankerungen geeignet zu sein. Dies gilt vor allem für den Zentralrechner und die Datenübertragungseinheit. Die gesammelten Daten müssen in Bezug auf die Größe von Dateien reduziert werden, um das Datentransfervolumen zu reduzieren. Für die Übertragung der Daten müssen verschiedene Technologien hinsichtlich der entsprechenden lokalen (Einsatzort der Systeme) Verfügbarkeiten bewertet werden. Mögliche Datenübertragungstechnologien könnten Funk, Mobilfunk (4G) oder Satellitentelefon-Kommunikationskanäle oder Wi-Fi sein. Es ist beabsichtigt, interne Netzwerksysteme zu entwickeln, die die verschiedenen Bojen mit einem lokalen (oder entfernten) Netzwerk verbinden.

Aufgabe 3.2: Entwurf und Aufbau eines Demonstrators (P1, P2-DFKI, P3) M7-M33, 2 PM
Basierend auf der Auswahl der Komponenten entwirft das Ingenieurteam die Haupteinheit entsprechend den Anforderungen des MATE-Beobachtungsnetzwerks. MATE-Hyper wird hier seine Anforderungen und Schnittstellen mit einbringen. Der abschließende Entwurf wird als Demonstrator sowohl für On-shore-Tests als auch für die Installation auf einer Boje aufgebaut. Der Demonstrator wird hinsichtlich der Datenerfassung, -speicherung und -weiterleitung getestet. Bei allen Komponenten wird die Nutzlast und Gewichtsverteilung auf der Boje berücksichtigt, um nicht deren Gesamtauftrieb zu gefährden.

- Für den Demonstrator wurde aufgrund der intensiven Entwicklungsarbeit am MATE-Hyper System selbst auf die vollständige Datenintegration verzichtet.
- Für den Demonstrator wurde damit vorrangig das Ziel, eine funktionierende Sensorik mit Kalibration aller Sensoren, einer gemeinsamen Lokalisierung und Orientierung, und Gewährleistung der Datenintegrität verfolgt.
- Es ist eine Auslegung auf so geringen Stromverbrauch wie möglich bei gleichzeitig leistungsstarker Recheneinheit notwendig.
- Ein Steigender Energiebedarf bei Nutzung an der Leistungsgrenze der Einheiten führte zur Wahl von 2 separate Einheiten für a) Datenerfassung und b) Analyse der RGB-Bilder durch KI-Algorithmen.

Die Beschreibung der vorgenommenen Arbeiten und der erzielten Leistungen sind in AP4 beschrieben.

2.1.3 AP4: Hyperspektrale Sensoren für Plastik und Ruß auf der Meeresoberfläche

Aufgabe 4.1: Entwicklung eines automatisierten statischen Awareness-Systems

Für den Aufbau des statischen Awareness-Systems wird eine Kombination aus geeigneten RGB- und IR-Kameras im sichtbaren und entsprechenden infraroten Spektralbereich ausgewählt. Um eine Weitwinkelbeobachtung oder sogar einen horizontalen Blickwinkel von 360° zu erreichen, werden geeignete optische Komponenten ausgewählt. Dies führt zu optischen Verzerrungen, die eine nachträgliche Korrektur beider Kameras erfordert. Diese sogenannte intrinsische Kalibrierung ist bei allen optischen Abbildungsverfahren des MATE-Hyper-Sensorsystems erfolgt. Zusätzlich wird die Integration oder Fusion von sichtbaren (RGB) und thermischen (IR) Informationen im Rechenzentrum von MATE-Hyper realisiert, wodurch quasi eine Pixel-zu-Pixel-Korrespondenz der von den verschiedenen Sensoren gelieferten Informationen erreicht wird. Erreicht wird dieses durch die Kombination aus vorgenannter Kalibrierung und Lokalisierung im Raum (6 Freiheitsgrade, je drei der Translation und 3 Rotation).

Basierend auf den fusionierten VIS-IR-Daten werden Algorithmen zur Merkmalerkennung auf die Bilder angewendet. Dies ist in der Trainingsphase der Algorithmen getrennt erfolgt. Objekte und ausgedehnte Bereiche von Oberflächensubstanzen, beides potentielle Schadstoffe, werden mit einem semantischen Datenmodell verknüpft (Verankerung) und zeitlich verfolgt. Das Ergebnis ist ein Modell, das Merkmale wie zentrale Position, Ausdehnung, Orientierung, Bewegung, Farbe und Wahrscheinlichkeit, eine der angestrebten Kontaminationen zu enthalten. Das System wird auf diesem Level im Labor und Feld getestet. Im Projektverlauf von MATE-Hyper ist hier der Fokus auf Plastik gelegt worden, da sich der künstliche Eintrag von Öl-Derivaten in Wasser ohne ausreichende Laborausüstung im Sinne der Chemie nicht umweltgerecht gestalten ließ. Hierdurch ist die Erfassung, Erkennung und Umsetzung in ein YOLOv5 Modell auf Basis wieder extrahierbaren Makroplastik Objekten in den Feldversuchen fokussiert worden.

Aufgabe 4.2: Entwicklung eines KI-basierten hyperspektralen Awareness-Systems

Die wahrscheinlichkeitsgewichtete Liste der Ziele (potenzielle Schadstoffe) wird als Liste von Ort verwendet, die mit einem hyperspektralen Strahlungsdichte-Sensor, der den UV-VIS-NIR-Bereich abdeckt, näher untersucht werden soll.

Dazu werden TriOS RAMSES-ARC Radiometer verwendet, deren optische Einheit den Sichtbereich auf weniger als 2 Grad reduziert. Die Bewegung des Radiometers, d.h. die Möglichkeit, auf einzelne Punkte zu zielen, wird durch eine robotergestützte PTU realisiert. Dies erfordert eine stellvertretende Referenzierung zwischen den Standorten im Bild und den Schwenk-/Neige-Koordinaten. Die Führung der PTU und ihrer Bahnen wird durch adaptive KI-Optimierungsalgorithmen erfolgen, sodass es effizient durch die wahrscheinlichsten Kontaminationsziele manövrieren kann. Der resultierende Datensatz der Einheit sind Spektren von verknüpften Objekten (Zielen) im semantischen Datenmodell. Die Optimierung und Validierung dieser Komponente für die Gesamtleistung wurden durch Feldversuche realisiert.

Aufgabe 4.3 High-Level-Aggregation und Feld Demonstration

Multispektrale Bildinformationen und lokalisierte Spektren erfordern eine einzigartige Integration und Interpretation. Die Kombination von zwei 2D-Sensoren mit automatisierter Merkmalsextraktion und

anschließender punktwiser hyperspektraler Untersuchung wird zu einer neuartigen 3D-Spektralkarte führen.

Die automatisierte Extraktion von Informationen aus diesen komplexen Daten wird durch wiederkehrende oder lange Kurzzeitgedächtnis Neuronale Netzwerke erfolgen und probabilistische Modelle für Verschmutzungseigenschaften unterstützen. Die Modelle werden dann mit einer Reihe von Situationen trainiert, die aus den Beobachtungen generiert und durch Mutation der beobachteten Daten weiter bevölkert werden. Die Datensätze werden nach dem Zufallsprinzip und wiederholt aufgeteilt, um eine Optimierung und Validierung zu ermöglichen. Durch die Kombination dieser Daten mit anderen Umweltbeobachtungen wird eine umfassende Wahrnehmung der Ozeangesundheit entwickelt, die eine Grundlage für die Entscheidungsunterstützung durch die Beteiligten darstellt.

Diese Aufgabe beinhaltet die Felddemonstration des integrierten Hyperspektralsensors und wurde a) in einer Hafenumgebung vom Kai aus für eine stabile Basislinienbewertung und b) von der Bojenplattform aus als Teil der Gesamtdemonstration durchgeführt. Für beide Fälle wurden künstliche Zielobjekte aus Trümmern und Oberflächenfilmen mit vordefinierten Charakteristiken verwendet.

Beschreibung des Sensorsystems - Sensorische Komponenten:

Als Übersichtskamera für Standard RGB Bilder wurde eine ALVIUM 1800 U-2050c der Firma Allied Vision genutzt. Montiert wurde hier ein Kowa LM6HC-Objektiv. Sie bietet eine hohe Auflösung von 5496 mal 3672 (Weite x Höhe) bei gleichzeitig geringen Kosten und Gewicht. Als RGB-Detail-Kamera mit gezoomtem Objektiv kommt eine Kamera vom Typ Mako G-319C derselben Firma zum Einsatz. Diese ermöglicht mit bis zu 37 FPS eine schnelle Erfassung des Spots, sofern genügend Licht zur Belichtung verfügbar ist. Die geringere Auflösung mit „nur“ 3.2 MP und damit 2064 mal 1544 ist durch die entsprechende Wahl Objektiv ausgeglichen werden. Die Wahl des Objektivs fiel auf das Fujifilm CF16ZA-1S. Somit wurde kein elektrisch verstellbares Zoom Objektiv gewählt, da dieses zum einen ein größeres Gehäuse benötigen würde, zum anderen eine vollständige Integration durch den Hersteller gewährleistet werden müsste, um diese Entwicklungsarbeit nicht selbst abbilden zu müssen. Es wurde daher eine feste Zoomstufe gewählt, die einen optimalen Kompromiss aus maximal möglicher Detailauflösung und minimalem Abstand von der Boje selbst darstellt, in der Objekte bestimmter Ausdehnung noch sinnvoll erkannt werden können. Der Abstand des Fokus-Bereichs von der Boje aus wurde in der Integrationsphase zu etwa 25m ermittelt und eingestellt.

Anders sieht es bei der als IR-Fokuskamera eingesetzten A700 der Firma Teledyne FLIR aus: Diese ist mit einem automatisiert einstellbaren Zoomobjektiv mit 6°-70-mm-Objektiv so gewählt, dass sie in derselben Region wie die RGB Varianten Objekte mit sinnvollem Detailreichtum erfassen kann. Die Auflösung beträgt hierbei 640 mal 480 Bildpunkten, 30 FPS. Der Fokusbereich wurde auf denselben Abstand eingestellt wie die RGB Zoom Kamera. Montiert sind die Sensoren dabei, wie in Abbildung 2 (mittig) gezeigt, an einer PTU von Teledyne FLIR, Modell PTU-D48. Dieses erlaubt 2,5-fache Rotation, so dass bei Übergang von 360° auf 361° kein voller Rückgang zur Initiallage erfolgt, sondern eine möglichst kontinuierliche Rotation ermöglicht wird.

Alle Kameras sind via Ethernet RJ45 Schnittstelle an das Rechnersystem angebunden. Dieses besteht aus zwei Einheiten NVIDIA Jetson Orin AGX, sog. Edge-Computing-Devices. Dies ermöglicht die Separation der beiden leistungshungrigsten Rechenprozesse während der Laufzeit:

- Detektion von Objekten via YOLO-Algorithmen aus den beiden RGB-Bildern, und
- Berechnung der Schwenk- und Neigewinkel für die PTU.

Zur Lagebestimmung der Boje wurde eine kostengünstige IMU von Phidgets verwendet. Die Spatial Precision 3/3/3 IMU kombiniert die Funktionalität eines 3-Achsen-Kompasses, eines 3-Achsen-Gyroskops und eines 3-Achsen-Beschleunigungsmessers. Über die AHRS- oder IMU-Algorithmen können aus den einzelnen Sensordaten Bewegungsdaten in Quaternionen für eine genaue räumliche

Verfolgung berechnet werden. Im Inneren des Rechnergehäuses lotrecht verbaut, können so direkt Daten gewonnen werden, die als Referenz für den ROS-internen Lokalisierungsalgorithmus verwendet werden, und somit die Basiskoordinate der PTU erzeugt werden.

Neben der Thermalen Erweiterung der RGB-Bilddaten durch IR Kamera Daten sind für ein vollständiges hyperspektrales Messsystem gezielte Informationen auch über die spektrale Verteilung innerhalb des sichtbaren Lichtbereichs oder darüber hinaus notwendig. Dazu können sogenannte spektralauflösende Radiometer zur Messung von Radianz oder Irradianz verwendet werden. Idealerweise wird dieser Bereich dazu auch in den ultravioletten und/oder infraroten Bereich erweitert. Die gewählten RAMSES Radiometer der Firma TriOS sind spektralauflösende Radiometer zur Messung von Radianz, Irradianz oder skalarer Irradianz im UV-, VIS- oder UV/VIS-Bereich. Durch geringes Gewicht und Baugröße, sowie sehr niedrigem Stromverbrauch sind sie besonders für den portablen oder autonomen Einsatz geeignet. Dies entspricht den Anforderungen an ein energieeffizientes Sensorsystem.

In MATE-Hyper wurde eine Kombination aus jeweils einem Radiometer für

- a. Radianz im spektralen Bereich von etwa 280nm bis 720 nm (entspricht UV plus VIS Bereich) als Fokus-Radiometer zusammen mit
- b. Irradianz im spektralen Bereich von etwa 320nm bis 950nm (entspricht UV plus VIS und NIR Bereich) als Referenz-Radiometer

gewählt. Sensor (a) ist ein ARC mit Adresse 01600080 und Seriennummer SN 87F9, der auf der PTU montiert wurde und die Daten per G2 Interface weitergibt. Der Sensor hat einen Lagesensor integriert, zeigt also den über das Messintervall gemittelten Winkel gegen die Lotrechte 90° entsprechend waagrecht für jedes aufgezeichnete Spektrum mit an. Damit kann der Sensor ebenfalls eine Information über die während der Messung eingehaltene Neigung der Boje aufzeigen.

Sensor (b) ist ein ACC mit der SN 860A, der die Referenzdaten des insgesamt verfügbaren Lichtes „am Himmel“ bzw die Sphärenhälfte oberhalb des Sensorkopfes gemessen während der Einsatzzeit erfasst. Der Messort wurde während der Demonstrationsphase möglichst nahe am Einsatzort der Boje und zudem so hoch wie möglich montiert. Die Wahl fiel auf ein Gebäude der Jade-Hochschule in Wilhelmshaven. Die Entfernung beträgt damit nur etwa 5,5km Luftlinie westlich vom Einsatzgebiet bzw Anker Platz der Boje im Ölhafen. Beide Sensoren sammeln die sog. PAR Werte, also das für Photosynthese relevante Lichtspektrum als 1 Wert pro Mess-Intervall (1/2 Minute), insgesamt 2880 Werte pro Tag.

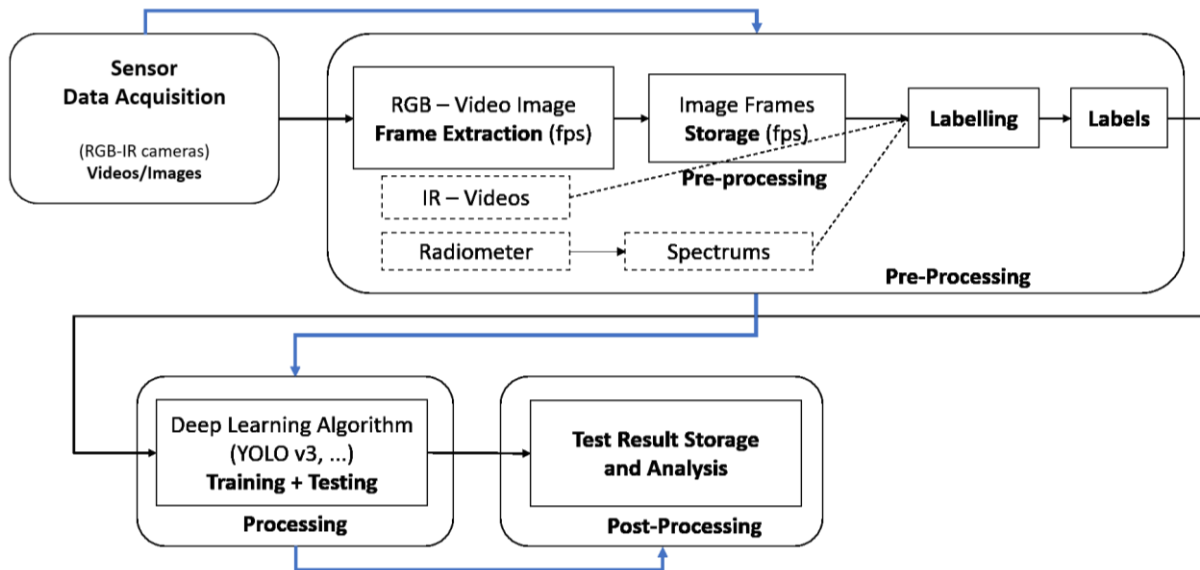


Abbildung 3: Flow Chart der Datenerfassung und des Training Prozesses der KI-Algorithmen sowie deren Einbettung in das Datenstrom Management durch ROS.

Ansteuerung des MATE-Hyper-Sensorsystems

ROS (Robot Operating System) dient als Middleware für die Rechereinheit, um die Kommunikation und Integration verschiedener Hardware- und Softwarekomponenten bestmöglich und gleichzeitig so universal wie möglich zu halten. Zur Entwicklung und zum Starten von Containeranwendungen werden Docker und systemd verwendet. Docker compose wird zur Orchestrierung von Multi-Container-Anwendungen eingesetzt, wobei isolierte Umgebungen in einer YAML-Datei definiert werden. Dadurch kann das komplette System mit einem einzigen Befehl gestartet werden. Da es keine ROS-Pakete für die genannten bzw. eingesetzten Radiometer gibt und der Aufwand für die Entwicklung eines solchen Pakets zur Erfassung von Radiometerdaten zu hoch ist, werden zwar die Radiometer auf der Boje montiert, die Daten werden jedoch mit der proprietären Software aufgezeichnet.

Das ROS-Paket für die Thermalkamera wurde erweitert, um den Austausch von CameraInfo-ROS-Nachrichten zu unterstützen. Diese Informationen sind für die intrinsische Kalibrierung essenziell. Die Übersichtskamera und die Detailkamera wurden mit dem ROS-Paket camera_calibration intrinsisch kalibriert. Das CAD-Modell der PTU und der Detailkamera wurde in eine Xacro URDF (Unified Robot Description Format) umgewandelt. Xacro ermöglicht die Verwendung von Makros in der URDF-Datei. Für die Umwandlung von Solidworks in URDF wurde das Add-in Solidworks to URDF Exporter verwendet.

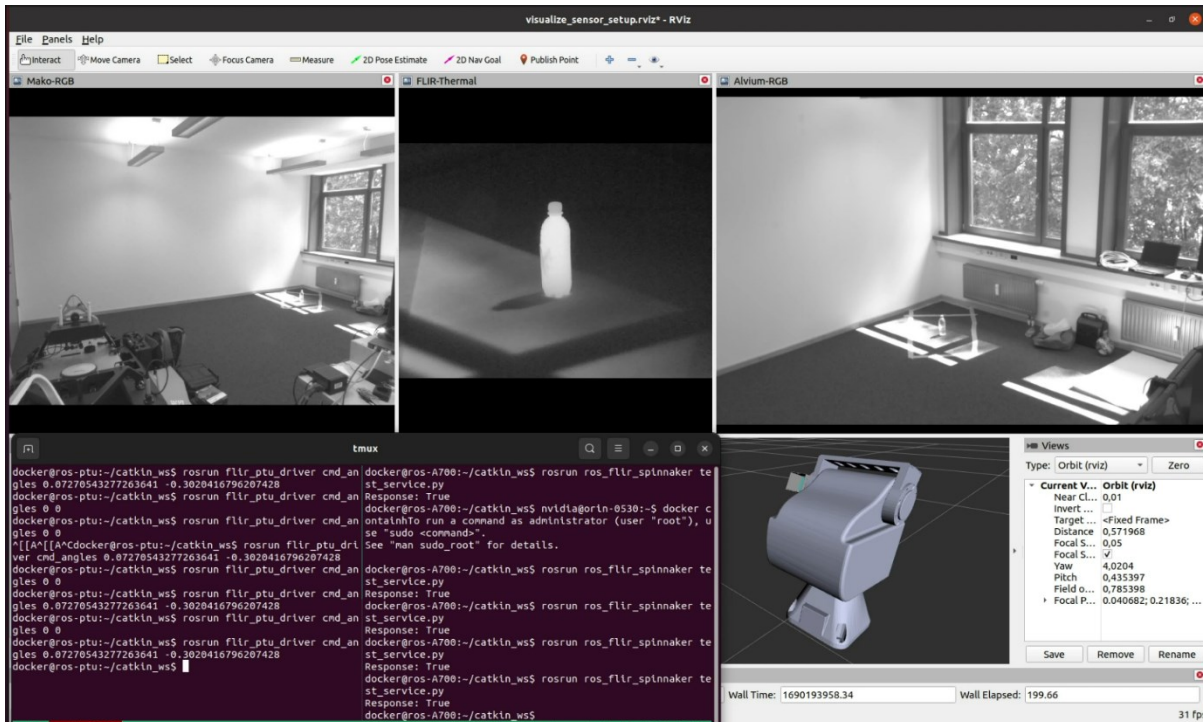


Abbildung 4: Visualisierung des Sensor-Setups in RViz. Mit den RGB-Bildern der Detail- und Übersichtskamera sowie dem Thermalbild von der Thermalkamera. Die Ansteuerung der PTU und des Autofokus von der Thermalkamera findet über das Terminal statt. Unten rechts ist das 3D-Modell mit dem aktuellen Zustand (Schwenk- und Neigewinkel) in der 3D-weltumgebung von RViz dargestellt.

Einsatz der KI-Funktionen – PTU Steuerung

Die Software der PTU ermöglicht es, via Webinterface (Firefox & Co.) direkt die Manipulation manuell vorzunehmen. Für das hier zu entwickelnde System ist dieses jedoch nicht sinnvoll, so dass eine automatisierte Steuerung entwickelt werden musste. Prinzipiell sollte eine Wahrnehmung eines interessierenden Objektes, dass durch eine Übersichtskamera erfasst wurde, die automatische „Fokussierung“ der Detailkameras auf diesen Bereich ermöglichen.

Um dieses grundsätzlich zu ermöglichen, war es notwendig, eine eigene Softwarelösung dafür zu erstellen. Aufgrund der Erfahrungen mit ROS als Steuerungssoftware und der grundsätzlich unterstützten Integrierbarkeit aller bildgebenden Sensoren, entweder bereits durch den jeweiligen Hersteller selbst oder aber durch Partner und Teilnehmer innerhalb der ROS-Community, wurde weiterhin ROS verwendet.

Es wurde eine ROS-Node entwickelt, die auf Basis der YOLO-Detektion die Schwenk- und Neigewinkel berechnet. Anschließend werden die Winkel über das Topic `/ptu/cmd` als `sensor_msgs/jointState` Message veröffentlicht und die PTU fährt das von YOLO detektierte Objekt aus der Ausgangsposition an. Um das Objekt zu tracken fehlt eine Feedback-Loop, um die Winkel auf Basis der aktuellen Position zu berechnen. Sowohl die Detektion mit YOLO in den beiden RGB-Bildern als auch die Berechnung der Schwenk- und Neigewinkel benötigen viele Ressourcen, daher wurde die Detektion auf einem Jetson Orin und die Berechnung der Winkel auf einem weiteren Jetson Orin ausgeführt. Neben der Detektion und Berechnung werden weitere ROS-Nodes ausgeführt, um die Sensordaten zu erfassen und aufzuzeichnen. Diese Nodes wurden auf den Jetson Orins entsprechend verteilt, um eine ausgeglichene Ressourcenauslast zu gewähren.

Dabei geschieht die Berechnung des Schwenks und Neigewinkel in folgenden Schritten

1. Ermitteln des 3D-Punktes aus (u, v) -Koordinaten: Die Funktion `projectPixelTo3dRay` aus dem ROS-Paket `image_geometry` berechnet zunächst mit Hilfe der Kameramatrix den Einheitsvektor, der vom Kamerazentrum durch das rektifizierte Pixel (u, v) verläuft. Das stellt den 3D-Punkt an dem sich das Objekt befinden würde, wenn es 1 Meter von der Kamera entfernt wäre.
2. Entfernung zum Objekt abschätzen: Die Entfernung zum Objekt schätzen, z. B. 10 Meter, und den in Schritt 1 erhaltenen Einheitsvektor mit dieser Entfernung multiplizieren, um den 3D-Punkt des Objekts im Kamerabild zu erhalten. Für die Entfernung kann ein fester Wert genutzt werden, wenn die Entfernung zwischen der Übersichts- und Detailkamera zum Objekt viel größer ist als die Distanz zwischen den Kameras.
 - a. Video suchen mit Camera-PTU-Entwicklung auf der die PTU zu sehen ist
 - b. Bild/Fotos des gesamten Stativs für Testentwicklung
3. In Neigungswinkel-TF-Frame transformieren: Diesen 3D-Punkt in den Frame des Neigewinkels von der PTU transformieren.
4. Berechnen des Neigungswinkels: Mit der Funktion `math.atan2(y, x)` wird der Neigungswinkel berechnet.
5. Die Schritte 3 & 4 für den Schwenkwinkel wiederholen.

Einsatz der KI-Funktionen – Objekt Detektion

Mehrere KI-spezifische Ansätze wurden während der Projektlaufzeit in Angriff genommen. Der erste Datensatz wurde aus Videoaufnahmen von Schiffen und Fahrzeugen im Nassahafen in Wilhelmshaven mit einer DJI Matrice Drohne und deren RGB und IR Kameras als Referenz für MATE erzeugt. Diese Daten erklären verschiedene schwimmende Objekte (Boote, Segelschiffe), die damit verbundene Physik und das Verständnis der Objektentfernung von einem Kamerasensor. Diese Daten wurden bereinigt (nach Zeitstempeln geordnet, auf fehlende Daten geprüft), dann wurden Bilder aus den Videos extrahiert. Diese extrahierten Bilder wurden für die Beschriftung im PASCAL VOC- und YOLO-Format mit der Software VoTT bzw. Labellmg vorbereitet.

Ein zweiter Datensatz konnte mithilfe der Erfassung von künstlich-schwimmenden Kunststoffen über Video von Kameras und radiometrische Graphen von Radiometern mit verfügbaren Sensoren erzielt werden. Am Standort des Projektpartners Universität Oldenburg, ICBM in Wilhelmshaven konnte in deren Außen-Messbecken (SURF, siehe Abbildung 5) Versuche durchgeführt werden.



Abbildung 5: Datenerfassung von schwimmenden Kunststoffen am Messbecken „SURF“ am ICBM Gelände in Wilhelmshaven. DJI Matrice 210 Drohne (am Boden, weißer Kreis links), weitere Kameras und Radiometer (weißer Kreis rechts oben).

Als Beispiel sind das RGB-Bild und das entsprechende IR-Bild von den Drohnen-Kameras in Abbildung 6 zu sehen. Die erzeugten synthetischen Daten von schwimmenden Kunststoffen mit RGB- und IR-Wärmekameras wurden einem Labelling Verfahren unterzogen, um daraus eine entsprechende erste Trainings Datenbank zu erhalten. RGB- und IR-Daten derselben Plastik Proben sind aufgrund der geringen Datenqualität, der verwendeten Kameras, den montierten Objektiven und durch zu großen Entfernungen zu den Aufstellorten nicht geeignet. Die entsprechenden radiometrischen Daten von Plastik Proben, um den Reflexionsgrad mit ICBM (WHV) Daten im Vergleich zu bestimmen, haben in den ersten Analysen ebenfalls gezeigt, dass weitere Daten zur Erhöhung der Qualität notwendig sind.



Abbildung 6: Sensoren - DJI Matrice (ohne Flug) zur schwimmenden Kunststoffdatenerfassung am SURF-ICBM mit den entsprechenden RGB- und IR-Bildern.

Eine weitere Kampagne mit der nun gelieferten Messboje konnte bei einem Test in der Nordsee genutzt werden, um eine Drohne vom Typ DJI MAVIC 2 Enterprise „zweckentfremdet“ als Kamerasystem mit RGB- und IR-Sensor einzusetzen. Hierbei wurden Daten von schwimmenden Kunststoffobjekten erfasst (siehe Abbildung 7). Die Kunststoffe wurden zusammengebunden, um ihren Verlust im Meer zu verhindern. Der Einsatz erfolgte hier jedoch ohne die Radiometer, da die Boje keine entsprechende Stromversorgung bot. Mit den Drohnenkameras wurden Videos aufgezeichnet und ausgewertet.

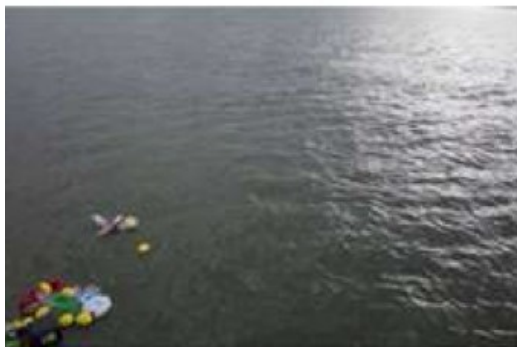


Abbildung 7: Oben: DJI MAVIC Enterprise Drohnenkamera montiert auf der Messboje mit schwimmenden Kunststoffen. Unten links: RGB-Bild der integrierten Kamera, dazu unten rechts das entsprechende IR-Wärmebild.

Zusätzlich wurden für die Detektion von Plastik-Müll im Labor mit verschiedenen Posen der Kameras Plastik Kollagen aufgezeichnet, um anschließend das YOLOv5-Netzwerk trainieren zu können

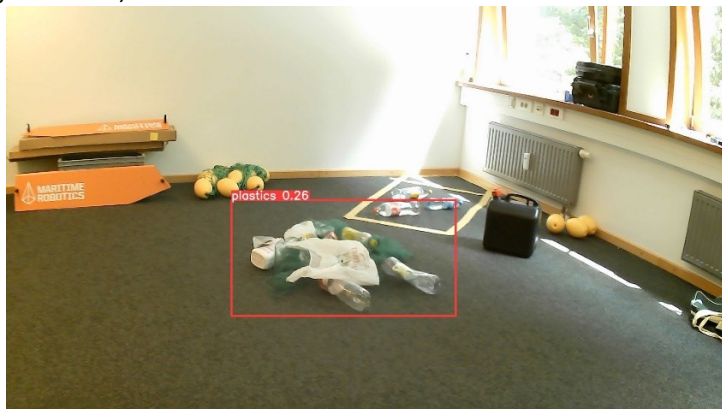


Abbildung 8: Beispiel für ein Test-Bild aus den Laborversuchen. Die Erkennung durch YOLOv5 ist als roter Rahmen mit Angabe der Zuverlässigkeit dargestellt.

Im nächsten Schritt wurde sogenanntes Transfer-Learning eingesetzt: Mit zusätzlichen Aufnahmen von Labor-Kunststoffen (siehe Abbildung 8) wurde das vortrainierte Modell „MAPO“ bzw. custom-YOLOs, basierend auf den ICBM-SURF Daten und den Bojen-Kampagnen mit schwimmenden Kunststoffen, erweitert. Ohne Transfer-Lernen kam es beim neuen Training dieses Modells zu Fehl- und Nicht-Klassifizierungen, wie in Abbildung 9 dargestellt.



Abbildung 9: Transfer-Learning Ergebnisse mit Laborkunststoffen zur Erweiterung des benutzerdefinierten YOLOv5s MAPO, das zuvor auf ICBM-SURF und Messbojen Einsätzen mit schwimmendem Kunststoff trainiert wurde.

Hierbei traten jedoch Schwierigkeiten auf, das Netz so in den Einsatz zu bekommen, dass es die PTU-Steuerung adäquat ermöglicht und gleichzeitig die Event Detektion, sich realisieren lässt. Zwar sind die Gewichte und yaml-Daten für die Plastikmüll-Erkennung nutzbar und entsprechend in einem GitLab verfügbar, um eine YOLO-Integration zu ermöglichen. Jedoch wird das Plastik in der FLIR-Thermal-Kamera nicht gut erkannt. Die Vermutung ist, dass das Plastik im Wasser sich zu schnell abkühlt. Durch die Fusion von RGB- und Thermalbilder wird YOLO nun nicht detektieren können. Hier wurde dennoch versucht die Fusion als Node zu realisieren, aber YOLO nur auf die RGB-Daten bei der Livestream Datenerfassung der Detailkamera anzuwenden. Das fusionierte Bild wird nur für spätere Entwicklungen aufgezeichnet. Ziel ist es, mit dem YOLO-Netz in der Bilderfassung ein Event zu detektieren, so dass sich die PTU auf das Event ausrichtet. Anschließend wird mit dem YOLO-Netzwerk weitere Details über das Event detektiert.

YOLOv5 wurde als ROS-Paket entwickelt und als Docker-Container-Image zur Verfügung gestellt.
Vortrainiert a) mithilfe der Gewichte für Plastik Erkennung genutzt, b) Test zwecks COCO Datensatz.

2.1.4 AP7: Beobachtungen von Abgasfahnen und Meeresoberfläche mit Hilfe von Drohnentechnik

Aufgabe 7.3 sollte den vom Cyprus Institut betriebenen speziellen Drohnen-Flughafen nutzen (der Flughafen befindet sich in der Nähe des Dorfes Orunda). Die Analyse sollte sich auf spezifische chemische Verbindungen konzentrieren und auch verschiedene Schwerölarnten. Eine kleine Infrarotkamera und kleine FTIR-Sensoren sollten vom Boden aus eingesetzt werden, um die Entwicklung der Rauchfahnen in Zeit und Raum zu beobachten. Dies wurde durch das Sensoriksystem aus AP4 ergänzt und Schnittstellen implementiert.

Diese Kooperation hat aus 2 Gründen nicht stattgefunden.

1. Das geplante Gesamtdemonstration des Bojensystems konnte nicht unter der Beteiligung aller Partnern stattfinden, sondern größtenteils nur mit den deutschen Beteiligten.
2. Zudem hat die Covid19-Pademie mit ihrer Auswirkung auf Reisen einerseits und auf die Beschaffungsvorgänge andererseits mit den genannten Verzögerungen eine entsprechende Entwicklung in diese Richtung verhindert.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die vorgestellte Arbeit stellt das Ergebnis intensiver Bemühungen an den verschiedenen Aufgaben der Arbeitspakete dar. Durch die genannten Bedingungen (Covid-Pandemie, Lieferverzögerungen, Produktabkündigungen) sind nach intensiver Planungsphase jedoch die Zusammenstellung der Komponenten des Sensorsystems stark verzögert worden, maßgeblich durch die angestrebten Beschaffungen.

Ab dem Moment der Umorganisation der Soll-Komponenten auf alternative oder wieder vorhandene Produkte (etwa ab März 2023, im Projekt M34!), wurde die Fertigstellung intensiv vorangetrieben. Das erhaltene System ist dadurch vollständig, jedoch nicht in vollem Funktionsumfang in den Einsatz gekommen.

2.4 Verwertbarkeit

Im Rahmen von MATE-Hyper wurde ein integriertes, auf künstlicher Intelligenz basierendes System entwickelt, das statische Kamerainformationen mit geführten hyperspektralen Spotdaten kombiniert. Durch die Datenverarbeitung mittels KI-Algorithmen konnte die technische Steuerung des Messsystems realisiert werden. Gleichzeitig wurden eigene KI-Modelle erzeugt und als Basis für die Bewertung der Wahrnehmung von Ereignissen in der unmittelbaren maritime Umgebung eingesetzt. Diese Entwicklung ist auch auf andere Szenarien anwendbar. Im DFKI als nicht-gewinnorientierte GmbH und Forschungszentrum ist keine direkte Kommerzialisierung vorgesehen, jedoch werden das MATE-Projekt und die Entwicklungen darin zu mehreren Innovationen mit Marktpotenzial führen.

2.4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Der kommerzielle Partner im Verbund, -4H-Jena engineering GmbH, wird in die Lage versetzt, ihren Kunden neue Produkte und Dienstleistungen anzubieten und damit ihr Portfolio und ihre kommerziellen Perspektiven zu stärken. Das DFKI selbst, insbesondere der Forschungsbereich Marine Perception, hat durch die Entwicklungen in MATE-Hyper ein starkes Know-How im Bereich der automatisierten Steuerung und Datenstrom Analysen durch KI-Algorithmen aufgebaut. Dieses Know-How führte zur Entwicklung weiterer Projektkonzepte und Forschungsanträge in Zusammenarbeit mit Industrie und Forschungspartnern und wird dadurch die Innovationsfähigkeit der europäischen Industrie in diesem zentralen Bereich stärken (siehe auch deutsche KI-Strategie).

Denkbar war zu Antragsstellung, dass eine Nutzung der Teilentwicklung durch Hafen- und Regierungsbehörden zur Deckung des steigenden Bedarfs an Überwachungsinstrumenten möglich wäre, um aktuelle und zukünftige Emissionsvorschriften erfüllen und/oder kontrollieren zu können. Ein System, das Verschmutzungen durch Schiffe und Plastikmüll detektieren kann, hat ein großes Potenzial im Markt für Umweltüberwachung.

Hier hat das Wasserschiffamt in Wilhelmshaven bereits Interesse gezeigt und das im Wasser verankerte Bojenmesssystem als sinnvolle technologische Innovation zur Überwachung und Analyse der Meeresumwelt bewertet. Durch Öffentlichkeitsarbeit in der lokalen Presse und Medien ist dieses bereits bekannt geworden.

Die Branche der Öl- und Gasindustrie hat ein starkes Interesse an der Überwachung der Meeresumwelt, um die Einhaltung von Umweltauflagen sicherzustellen und mögliche Verschmutzungen frühzeitig zu erkennen. In der Schifffahrtsindustrie selbst sind Nachhaltigkeitsinitiativen seitens der Reedereien und Schiffseigner zunehmend gefordert, deren Umweltbilanz zu verbessern. Ein System, das ihnen hilft, Emissionen und die Auswirkungen auf die Meeresumwelt zu überwachen, kann wertvolle Daten liefern und zur Verbesserung der Nachhaltigkeit beitragen

2.4.2 Wissenschaftliche Erfolgsaussichten

Neben den genannten Daten, die den Zweck der Erprobung innerhalb der Projektlaufzeit haben, können mit einem vollständigen System wertvolle Daten für wissenschaftliche Studien an Universitäten und Forschungsinstitute erzeugt werden. Es können umfassende Daten über die Meeresverschmutzung gesammelt werden und dadurch neue Erkenntnisse über die Auswirkungen von Plastik und anderen Schadstoffen auf marine Ökosysteme gewonnen werden. Gleichzeitig können weitere Kooperationen mit akademischen Einrichtungen die Entwicklung und Validierung des Systems unterstützen. Mit der Arbeitsgruppe Marine Sensorsystem des ICBM der

Universität Oldenburg, Leitung Dr. Thomas Badewien, ebenfalls Partner des Gesamtvorhabens, wurde bereits über weitere gemeinsame Einsatzmöglichkeiten des MATE-Hyper Sensorsystems und dessen Komponenten gesprochen.

Die Anwendung des Systems erfordert Kenntnisse aus verschiedenen Disziplinen wie Meeresbiologie, Chemie, Umweltwissenschaften und Ingenieurwesen. Interdisziplinäre Forschungsansätze können die Effektivität und die Anwendungsbreite des Systems steigern.

2.4.3 Wissenschaftlich-wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die verwendete Technologie von MATE und die in MATE entwickelte Softwarearchitektur unterstützt ein gewisses Maß an Flexibilität, welches sich für zukünftige Anwendungen anbietet.

Das DFKI nutzt bereits die auf KI-Basis gewonnenen Ergebnisse für weitere technische Entwicklungen in Zusammenarbeit mit Forschungs- und Industriepartnern im Bereich multimodaler und hyperspektraler Sensorsysteme. Dies ermöglicht neue Messmethoden für Meeresoberflächen und oberflächennahen Schichten, etwa:

1) Bewertung von Kunststoffabfällen in der aquatischen Umwelt

Beispielsweise beschäftigt sich das Projekt [APLASTIC-Q-Canada](#) mit der Weiterentwicklung von KI-Methoden zur Erkennung und Analyse von Müll in Flüssen und Kanälen. Zum Einsatz kommen stationäre Kamerasysteme, welche eine Langzeitüberwachung der betroffenen Wasserflächen ermöglicht. Die verwendeten KI-Methoden werden im Rahmen des Projektes erweitert, um die umgebungsspezifischen Gegebenheiten, wie zum Beispiel Eisschollen, abbilden zu können.

Auch das [PlasticObsPlus](#) Projekt zielt darauf ab, ein integriertes Messsystem zur routinemäßigen, quasi-synoptischen Erfassung und Darstellung der Verteilung von Plastikmüll an der Wasseroberfläche und an Ufer- bzw. Küstenstreifen in einem Lagebild mittels innovativer KI-Technologien und moderner Fernerkundung (z.B. Flugzeuge oder Flugdrohnen) zu entwickeln.

2) neue Technologien zum Schutz von Küstenlinien

Hier wurde ein Forschungsantrag beim BMUV gestellt zu dem Thema „SEA and Coastal based monitoring strategies - employing AI to protect threatened Ecosystems“. Dieser Antrag wird derzeit begutachtet.

Im wissenschaftlichen Bereich ist die weitere Nutzung des Systems bereits parallel zur Projektlaufzeit von MATE angestrebt und erzielt worden. Ähnlich dem parallel durchgeführten Projekt CoPDA, das im Wesentlichen das Know-How zu ROS als Datenstrom Management Systems sowohl zur Datenerfassung (Sensorintegration) als auch Datenprozessierung lieferte, hat die konsequente Nutzung von ROS auch innerhalb der Entwicklung des MATE-Hyper Sensor-Systems eine Weiterentwicklung des Know-Hows in der DFKI Arbeitsgruppe Marine Perception erwirken können. Das System zur Erfassung von Spektralen Daten zusätzlich zu den RGB-Daten wird in weiteren Projekten innerhalb des DFKI Oldenburg genutzt. Wesentliche Komponenten des MATE-Hyper Sensor-Systems werden so etwa im Projekt [HAI-x – Hybrid AI-explainer](#) adaptiert, um die Bewegung und

Aktionen eines Bootes zur Erfassung und potentiellen Extraktion von Pflanzen zu ermöglichen.

Für die Firma -4H-JENA engineering GmbH (Deutschland) als Entwickler und Produzent von Mess- und Analysetechnik für limnologische und marine Umwelten besteht ein gutes Potential für eine spätere wirtschaftliche Umsetzung der technologischen Entwicklungen und Erfahrungen aus MATE-Hyper. - 4H-JENA als Hersteller der Komponenten nach Weiterführung des Konzeptes über TRL6 hinaus zum kommerziellen Produkt.

2.5 Bekannt gewordener Fortschritt

In diesem Bereich der automatisierten Erkennung von Events zu Plastikverschmutzungen und/oder Ruß auf dem Wasseroberflächen sind bisher keine anderen Fortschritte bekannt geworden.

2.6 Veröffentlichungen

Die folgende Auflistung stellt Veröffentlichungen dar, an denen das DFKI beteiligt war.

Oliver Ferdinand; Nick Rüssmeier; Andrej Lejman; Martin Günther; Friedemann Kammler; Frederic Theodor Stahl; Oliver Zielinski: Comprehensive Perception in Marine Environments for Dynamic Anchoring

In: Proceedings of OCEANS 2023. OCEANS MTS/IEEE Conference (OCEANS-2023), June 5-8, Limerick, Ireland, ISBN 979-8-3503-3226-1, IEEE, 2023.

Navya Prakash; Frederic Theodor Stahl; Charles Lennart Müller; Oliver Ferdinand; Oliver Zielinski: Intelligent Marine Pollution Analysis on Spectral Data In: OCEANS 2021 San Diego - Porto Online Proceedings. OCEANS MTS/IEEE Conference (OCEANS-2021), September 20-23, Online, Porto, Portugal, Pages 1-6, No. 21623225, ISBN 978-0-692-93559-0, IEEE Xplore Digital Library, Piscataway Township, New Jersey, 2/2022.

3 Fazit und Ausblick

Ergebnisse in den Daten

Das Sensorsystem konnte vollständig in den Einsatz gebracht werden. Alle Sensoren sind in den Datenstrom integriert worden, mit Ausnahme der beiden Radiometer. Hier liegt noch die Notwendigkeit vor, via MODBUS Programmierung eine Schnittstelle zu schaffen, die die Daten direkt in das ROS-System einbinden kann. Letzteres ist durch den Defekt des Fokus-Radiometers und der entsprechenden Support-Zeit seitens des Herstellers nicht mehr vor der finalen Kampagne realisierbar gewesen.

Die Performanz der im Rahmen des Projektes entwickelten Algorithmen ist nach Abschluss der Entwicklung bleibt hinter den Erwartungen zurück. Dies ist auf fehlende Realdaten für das Training der Algorithmen zurückzuführen. Das Transfer-Learning zeigte einen positiven Effekt. Es konnte jedoch noch nicht berücksichtigt werden, dass die Objekte im Labor eine signifikant-andere Charakteristik im IR-Bild zeigen, als in der realen Umgebung, d.h. im Wasser.

Die Entwicklung eines Algorithmus für die Auswertung von Radiometerdaten wurde abgeschlossen. Mit diesem Algorithmus können Events (im Post-Processing) identifiziert werden, solange die Daten noch nicht direkt in den ROS-Datenstrom integriert sind. Der finale Test konnte jedoch aufgrund von fehlenden Daten aus der Messkampagne nicht durchgeführt werden.

Während der Laufzeit der Demonstration innerhalb der finalen MATE-Kampagne im September 2023 konnten Datenaufnahme mit RGB Zoom Kamera und IR-Kamera erfolgreich absolviert werden. Gleichzeitig konnten Daten mit beiden Radiometern, also sowohl die Referenz- als auch Spotdaten des Fokus-Radiometers erfolgreich aufgenommen werden. Nach Sichtung der Daten des Sensorsystems, haben zu den aktiven Kamerazeiten offenbar keine Events stattgefunden. In den Daten bzw. ROSBAG-Paketen sind keine solchen aufgezeichnet. Dazu liegt folgende Begründung vor:

Das Energiesystem lief zufriedenstellend für ca. 48 Stunden, bevor ein Fehler im Energiemanagement erfolgte. Vermutlich wurde durch die kurzfristig durchgeführten Installationen deutlich mehr Strom verbraucht. Ein Austausch der kommerziellen AGM-Batterien war auf See bei Wellengang aufgrund der Wetterbedingungen zur Laufzeit der Kampagne nicht möglich.

Durch diese fehlenden Daten ist ein finaler Test der entwickelten KI-Systeme nur erschwert möglich. Die Evaluation der Algorithmen muss mit Daten aus anderen Quellen durchgeführt werden, da sich aus den ROSBAGS mit Video Stream Daten keine Events mit Schiffen oder Plastikverschmutzungen ergeben.

Zudem konnte der Betrieb der Boje mit dem Sensorsystem nicht stabil genutzt werden, um z.B. künstliche Objekte in die Erfassung der Kameras zu bringen. Ein ähnliches Eintragen von schwimmendem Plastik ist zwar vorgesehen gewesen, war jedoch ebenfalls aufgrund der Wetterbedingungen nicht möglich. Dies hätte einen Test in realer Umgebung als nächsten Schritt der Durchführbarkeit dargestellt.

Literaturverzeichnis

- Andreoli, G, et al. 2007. Hyperspectral analysis of oil and oil-impacted soils for remote sensing purposes. European Commission Joint Research Centre: Luxembourg, 36.
- Bachmann, C. M., Eon, R. S., Lapszynski, C. S., Badura, G. P., Vodacek, A., Hoffman, M. J., ... & Foote, M. (2019). A low-rate video approach to hyperspectral imaging of dynamic scenes. *Journal of Imaging*, 5(1), 6.
- Delory E, Pearlman J. 2018. Challenges and Innovations in Ocean in situ Sensors, Elsevier, 408 pp.
- Garaba SP, Voß D, Wollschläger J, Zielinski O (2015) Modern approaches to shipborne ocean color remote sensing. *Applied Optics* 54 (12), 3602-3612
- Garaba, S. P., Aitken, J., Slat, B., Dierssen, H. M., Lebreton, L., Zielinski, O., & Reisser, J. (2018). Sensing ocean plastics with an airborne hyperspectral shortwave infrared imager. *Environmental science & technology*, 52(20), 11699-11707.
- Judd, K. P., Nichols, J. M., Waterman, J., Olson, C. C., Lee, K., & Scriven, G. A Panoramic Shortwave Infrared Hyperspectral Sensor for Maritime Sensing.
- Leykin, A, et al. 2007. Thermal-visible video fusion for moving target tracking and pedestrian classification. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*: 1-8.
- Moore C, Barnand A, Fietzek P, Lewis M, Sosik H, White S, Zielinski O (2009): Optical tools for ocean monitoring and research. *Ocean Science*, 5, pp 661-684, doi:10.5194/os-5-661-2009
- Oehmcke, S., Zielinski, O., Kramer, O. (2017). Input quality aware convolutional LSTM networks for virtual marine sensors. *Neurocomputing* 275: 2603–2615.
<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.11.027>
- Rüssmeier, N., Hahn, A., Nicklas, D., & Zielinski, O. (2016) Ad-hoc Situational Awareness by Optical Sensors in a Research Port Maritime Environment: Approved Networking and Sensor Fusion Technologies. In *Proceedings* (Vol. 18, pp. 715-722).
- Rüssmeier, N., Hahn, A., Nicklas, D., & Zielinski, O. (2017). A research port test bed based on distributed optical sensors and sensor fusion framework for ad hoc situational awareness. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 6(1), 37.
- Vansteenwegen, D., Ruddick, K., Cattrijsse, A., Vanhellemont, Q., & Beck, M. (2019). The pan-and-tilt hyperspectral radiometer system (PANTHYR) for autonomous satellite validation measurements— Prototype design and testing. *Remote Sensing*, 11(11), 1360.
- Wang, P, et al. 2019. Exploring the application of artificial intelligence technology for identification of water pollution characteristics and tracing the source of water quality pollutants. *Science of The Total Environment* 693: 133440.
- Zielinski, O., Busch, J. A., Cembella, A. D., Daly, K. L., Engelbrektsson, J., Hannides, A. K., & Schmidt, H.

(2009). Detecting marine hazardous substances and organisms: sensors for pollutants, toxins, and pathogens. *Ocean Science*, 5(3), 329.

Lin, Tsung-Yi et al. 2014. Microsoft COCO: Common Objects in Context. CoRR, abs/1405.0312, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1405.0312>

UN, (2019) Global Environment Outlook. Available at: <https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-6>